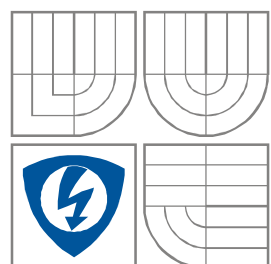




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A
KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIO ELEKTRONIKY**

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS**

Měření vlastností operačních zesilovačů

Measurement of the properties of operation amplifier

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

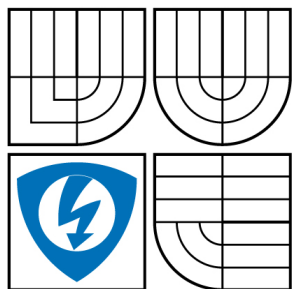
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Michal Lacko

VEDÚCI PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Radim Kolář, Ph.D.

BRNO, 2008



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Elektronika a sdělovací technika

Student: Lacko Michal

ID: 78541

Ročník: 3

Akademický rok: 2007/2008

NÁZEV TÉMATU:

Měření vlastností operačních zesilovačů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s koncepcí programového prostředí LabView 7.1 (resp. 8.2) a navrhnete jeho možné využití pro měření vlastností operačních zesilovačů. Sestavte přehled základních parametrů operačních zesilovačů. Dále se seznamte s vlastnostmi měřicí karty NI-6221 PCI a navrhnete její využití pro měření parametrů operačních zesilovačů z hlediska její dosažitelné přesnosti.

Realizujte v LabView aplikaci, která bude umožňovat proměření frekvenční charakteristiky a případně dalších charakteristik a parametrů dle pokynů vedoucího. Aplikaci otestujte na reálných zapojeních s operačním zesilovačem.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] WELLS, L.K, TRAVIS, J. LabVIEW for Everyone: Graphical Programming Made Even Easier. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 2001.

[2] VRBA, K. Analogová technika. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně.

Termín zadání: 11.2.2008

Termín odevzdání: 6.6.2008

Vedoucí práce: Ing. Radim Kolář, Ph.D.

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Michal Lacko
Bytem: Drietoma 381, 913 03
Narozen/a (datum a místo): 6. června 1986 v Trenčíně

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida, předseda rady oboru Elektronika a sdělovací
technika
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
 - ☐ diplomová práce
 - ☒ bakalářská práce
 - ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Měření vlastností operačních zesilovačů

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Radim Kolář, Ph.D.

Ústav: Ústav radioelektroniky

Datum obhajoby VŠKP: _____

VŠKP odevzdal autor nabyvateli*:

- | | | |
|----------------------------------------------------------|---|--------------------|
| <input checked="" type="checkbox"/> v tištěné formě | – | počet exemplářů: 2 |
| <input checked="" type="checkbox"/> v elektronické formě | – | počet exemplářů: 2 |

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.

3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.

4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

* hodící se zaškrtněte

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ☒ ihned po uzavření této smlouvy
 - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
 - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
 - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
 - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 6. června 2008

.....
Nabyvatel

.....
Autor

ABSTRAKT

Tento projekt zahrnuje přehled operačních zesilovačů používaných při měření biologických signálů. Zaměřuje se především na parametry, které jsou důležité v biomedicínské technice. Hlavní podstatou projektu je vytvoření aplikace (virtuálních přístrojů), které přeměří vybrané vlastnosti. Aplikace jsou tvořeny pomocí programovacího prostředí LabView 7.1, měřicí karty NI PCI-6221 a zkonstruovaného výrobku. Projekt obsahuje čtyři aplikace: měření frekvenční charakteristiky, automatizované měření frekvenční charakteristiky, měření napěťové nesymetrie a měření diskriminačního činitele.

KLÍČOVÉ SLOVA

Operační zesilovač, LabVIEW 7.1, Vlastnosti, Virtuální přístroj

ABSTRACT

This thesis includes a survey of operation amplifiers used for biological signal measurement. The first part is focused on the description of amplifier's properties which are important in biomedical engineering. The next part describes several applications (virtual instruments) which measure selected properties.

These applications are created with the help of the programming environment LabView 7.1, the measuring card NI PCI-6221 and a suggested product. The project includes four applications: measuring of frequency characteristics, automated measuring of frequency characteristics, measuring of input offset voltage, and measuring of common-mode rejection.

KEYWORDS

Operation amplifier, LabVIEW 7.1, Properties, Virtual instrument

LACKO, M. *Měření vlastností operačních zesilovačů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 46 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Radim Kolář, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Měření vlastností operačních zesilovačů jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 6. června 2008

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Radim Kolář, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 6. června 2008

.....
podpis autora

Obsah

Obsah.....	7
1. Úvod.....	10
2. Základné údaje operačných zosilňovačov v katalógu.....	11
2.1 Veľkosť napájacieho napätia.....	11
2.2 Maximálny rozdiel vstupných napätí.....	11
2.3 Maximálny stratový výkon.....	11
2.4 Napäťová nesymetria.....	11
2.5 Prúdová nesymetria.....	12
2.6 Vstupný kludový prúd.....	12
2.7 Frekvenčný rozsah.....	12
3. Spätná väzba v operačných zosilňovačoch.....	13
4. Základné zapojenia operačných zosilňovačov.....	15
4.1 Invertujúci zosilňovač.....	15
4.2 Neinvertujúci zosilňovač.....	15
5. Základné parametre operačných zosilňovačov pre elektrické biologické signály.....	17
5.1 Vstupný a výstupný odpor.....	17
5.2 Meniteľná hodnota napäťového zosilnenia.....	17
5.3 Diskriminačný činiteľ CMR (CMRR).....	18
5.4 Nízky šum.....	19
6. Prehľad používaných meracích kariet v laboratóriu na Ústave Biomedicínskeho inžinierstva.....	20
6.1 Presnosť merania meracej karty.....	21
7. Generovanie a meranie napätia pomocou meracej karty a programu LabVIEW 7.1.....	22
7.1 Vytvorenie virtuálneho prístroja pre analógový výstup.....	22
7.2 Vytvorenie generovaného signálu.....	24
7.3 Vytvorenie virtuálneho prístroja pre analógový vstup.....	25
7.3.1 RSE zapojenie analógového vstupu.....	25
7.3.2 Diferenčné zapojenie analógového vstupu.....	26
8. Meranie frekvenčnej charakteristiky.....	28
9. Automatizované meranie frekvenčnej charakteristiky.....	30
10. Meranie napäťovej nesymetrie.....	33
11. Meranie diskriminačného činiteľa CMR.....	34
12. Testy aplikácií na reálnych zapojeniach.....	36
12.1 Meranie frekvenčnej charakteristiky.....	36
12.2 Meranie napäťovej nesymetrie.....	38
12.3 Meranie diskriminačného činiteľa CMR.....	39
13. Záverečné vyhodnotenie.....	40
14. Použitá literatúra a internetové stránky.....	41
15. Príloha.....	42

Zoznam obrázkov

OBR. 2.1: MODULOVÁ CHARAKTERISTIKA REÁLNEHO OPERAČNÉHO ZOSILŇOVAČA	12
OBR. 3.1: SÉRIOVÉ SPÄTNÉ VÄZBY A) NAPÄŤOVÁ B) PRÚDOVÁ	13
OBR. 3.2: PARALELNÉ SPÄTNÉ VÄZBY A) NAPÄŤOVÁ B) PRÚDOVÁ	13
OBR. 4.1: ZAPOJENIE INVERTUJÚCEHO ZOSILŇOVAČA.....	15
OBR. 4.2: ZAPOJENIE NEINVERTUJÚCEHO ZOSILŇOVAČA.....	15
OBR. 5.1: IDEALIZOVANÁ NÁHRADNÁ SCHÉMA OPERAČNÉHO ZOSILŇOVAČA.....	17
OBR. 5.2: SCHÉMA ZAPOJENIA OPERAČNÉHO ZOSILŇOVAČA INA 121	18
OBR. 5.3: ZAPOJENIE PRE MERANIE: A) ROZDIELOVÉHO ZOSILNENIA B) SÚHLASNÉHO ZOSILNENIA	18
OBR. 5.4: PRIEBEH NAPÄTIA SO ŠUMOM	19
OBR. 6.1: PREPOJENIE MERACEJ KARTY KU KONEKTOROVÉMU BLOKU	20
OBR. 6.2: BLOKOVÁ SCHÉMA MERACEJ KARTY NI PCI-6221	20
OBR. 7.1: NASTAVENIE KANÁLU NA ANALÓGOVÝ VÝSTUP.....	22
OBR. 7.2: NASTAVENIE NAPÄŤOVÉHO ANALÓGOVÉHO VÝSTUPU BLOKU DAQMX CREAT VIRTUAL CHANNEL	22
OBR. 7.3: NASTAVENIE BLOKU DAQMX TIMING PRE ANALÓGOVÝ VÝSTUP.....	23
OBR. 7.4: NASTAVENIE BLOKU DAQMX WRITE PRE ANALÓGOVÝ VÝSTUP.....	23
OBR. 7.5: PREPOJENIE BLOKOV POMOCOU KTORÝCH ZAPISUJEME GENEROVANÝ SIGNÁL.....	23
OBR. 7.6: NASTAVENIE PARAMETROV BLOKU NUMERIC CONTROL.....	24
OBR. 7.7: ZAPOJENIE GENERUJÚCE A ZAPISUJÚCE HARMONICKÝ SIGNÁL NA ANALÓGOVÝ VÝSTUP	24
OBR. 7.8: NASTAVENIE NAPÄŤOVÉHO ANALÓGOVÉHO VSTUPU BLOKU: DAQMX CREAT VIRTUAL CHANNEL.....	25
OBR. 7.9: RSE ZAPOJENIE ANALÓGOVÉHO VSTUPU	25
OBR. 7.10: DIFERENČNÉ ZAPOJENIE ANALÓGOVÉHO VSTUPU	26
OBR. 7.11: NASTAVENIE BLOKU DAQMX PRE ANALÓGOVÝ VSTUP	26
OBR. 7.12: NASTAVENIE BLOKU DAQMX READ PRE ANALÓGOVÝ VSTUP	27
OBR. 7.13: ZAPOJENIE , KTORÉ NAČÍTAVA SIGNÁL NA ANALÓGOVOM VSTUPE	27
OBR. 8.1: VIRTUÁLNY PRÍSTROJ , KTORÝ GENERUJE A NÁSLEDNE ČÍTA SIGNÁL PRE JEDNOTLIVÉ SEKVENCIE.....	28
OBR. 8.2: VÝPOČET , ZÁPIS A VYKRESLENIE NAPÄŤOVÉHO ZOSILNENIA.....	29
OBR. 9.1: ZAPOJENIE BLOKOV PRE VEĽKOSŤ ZMENY FREKVENCIE NA JEDEN KROK V OKNE BLOCK DIAGRAM	30
OBR. 9.2: NASTAVENIE POČTU OPAKOVANÍ PRE ŠTRUKTÚRU FOR LOOP	30
OBR. 9.3: ZAPOJENIE GENERUJÚCE HARMONICKÝ SIGNÁL.....	31
OBR. 9.4: VYTVORENIE NAPÄŤOVÉHO ANALÓGOVÉHO VÝSTUPU	31
OBR. 9.5: VYTVORENIE NAPÄŤOVÉHO ANALÓGOVÉHO VSTUPU	31
OBR. 9.6: PREPOJENIE CHYBOVÝCH HLÁSENÍ	32
OBR. 9.7: VIRTUÁLNY PRÍSTROJ , KTORÝ PREMERIA AUTOMATIZOVANE FREKVENČNÚ CHARAKTERISTIKU	32
OBR. 10.1: VIRTUÁLNY PRÍSTROJ , KTORÝ PREMERIA NAPÄŤOVÚ NESYMETRIU	33
OBR. 11.1: SCHÉMA ZAPOJENIA PRÍPRAVKU	34
OBR. 11.2: ROZLOŽENIE SÚČIASTOK NA PRÍPRAVKU	34
OBR. 11.3: OKNOVÉ HLÁSENIE	35
OBR. 11.4: VIRTUÁLNY PRÍSTROJ PRE MERANIE CMR.	35
OBR. 12.1: DOLNOPRIEPUSTNÝ FILTER RC.....	36
OBR. 12.2: ZMERANÁ FREKVENČNÁ CHARAKTERISTIKA DOLNOPRIEPUSTNÉHO FILTRU TYPU RC	36
OBR. 12.3: VSTUPNÝ ZOSILŇOVAČ POUŽÍVANÝ PRI MERANÍ KOROTKOVÝCH ZVUKOCH	37

OBR.12.4: ZMERANÁ FREKVENČNÁ CHARAKTERISTIKA VSTUPNÉHO ZOSILŇOVAČA POUŽÍVANÉHO PRI MERANÍ KOROTKOVÝCH ZVUKOV	37
OBR. 12.5: DIFERENČNÉ ZAPOJENIE OPERAČNÉHO ZOSILŇOVAČA	38
OBR. 12.6: NAMERANÁ HODNOTA NAPĀŤOVEJ NESYMETRIE	38
OBR. 12.7: UŽÍVATEĽSKÉ ROZHRAŇIE APLIKÁCIE MERAJÚCEJ DISKRIMINAČNÍ ČINITEĽ	39

Zoznam tabuliek

TABUĽKA 6.1: ROZLIŠOVACIE SCHOPNOSTI MERACEJ KARTY NI PCI-6221 PRE VŠETKY ROZSAHY	21
TABUĽKA 6.2: ROZLIŠOVACIE SCHOPNOSTI MERACEJ KARTY NI PCI-6024E PRE VŠETKY ROZSAHY	21
TABUĽKA 12.1: POROVNANIE KATALÓGOVÝCH ÚDAJOV A ZMERANÝCH HODNÔT APLIKÁCIU ..	39

1. Úvod

Operačné zosilňovače sa stali jedným z najuniverzálnejšími obvodovými prvkami v elektrotechnike. Táto univerzálnosť spočíva predovšetkým v možnosti použitia rôznych spätných väzieb a to za pomoci pasívnych či aktívnych prvkov, ktoré určujú činnosť celého obvodu.

Operačné zosilňovače v riadiacich systémoch majú často za úlohu vstupný signál nielen zosilniť, ale aj určitým spôsobom spracovať (funkčne upraviť). Sú to rôzne operácie spočítania, odčítania, násobenia, delenia, integrovania, derivovania a vytvorenia rôznych iných lineárnych aj nelineárnych funkcií. Sú vyhotovené integrovanou technológiou na kuse plátku kryštálu kremíka, ktorý môžeme považovať za samostatnú súčiastku.

V biomedicínskej technike sú operačné zosilňovače hlavnou časťou všetkých elektronických prístrojov, ktoré snímajú biologické signály. Využívané sú hlavne v diagnostickej technike pri zosilňovaní signálov EKG, EEG, EMG. Pri spracovaní signálu ich využívame viacnásobne, a to ako predzosilňovače, zosilňovače filtrovaného signálu alebo ako funkčné bloky, ktoré majú za úlohu signál upraviť prípadne porovnať (komparátor). Ďalším odvetvím, ktoré využíva operačné zosilňovače je terapeutická technika. Pri terapii potrebujeme potlačený snímaný signál zosilniť a následne vrátiť ako stimulačný elektrický impulz späť na postihnutý sval. Tento postup sa využíva hlavne pri IMF terapii.

2. Základné údaje operačných zosilňovačov v katalógu

2.1 Veľkosť napájacieho napätia

Veľkosť napájacieho napätia je jedným z najdôležitejších parametrov operačných zosilňovačov. Ak budeme dodržiavať stanovené napätie výrobcu, nemusíme sa obávať následného poškodenia. Prekročenie maximálneho napájacieho napätia môže mať za následok prieraz alebo iné znehodnotenie obvodu. Ak by sme prekročili minimálne napätie, môže sa stať, že obvod prestane pracovať správne. [2]

2.2 Maximálny rozdiel vstupných napätí

Jedná sa o napätie, ktoré môžeme pripojiť na invertujúci vstup za predpokladu, že je neinvertujúci vstup uzemnený. U súčasných typov nebezpečie prekročenia nehrozí, pretože dovolené napätie na vstupe operačného zosilňovača je zrovnateľné s napájacím napätím, niekedy i túto hodnotu aj presahuje. Tak napríklad INA121 a INA128 majú dovolené vstupné rozdielové napätie $\pm 40V$. [2]

2.3 Maximálny stratový výkon

Myslí sa tým výkonová strata, ktorú môže systém operačného zosilňovača vyžiarit' v podobe tepla do okolia, tak aby sa nedovolené zvýšila teplota operačného zosilňovača. Platí to pre špecifikované (presne stanovené) podmienky, predovšetkým pre veľkosť záťaže a napájacieho napätia. Operačné zosilňovače vyrobené v plastovom prevedení majú nižší maximálny stratový výkon. Mali by sme vziať na vedomie, že s preťažením operačného zosilňovača spravidla dochádza k nesprávnej funkcii zosilňovača a pri dlhšie trvajúcom preťažení hrozí poškodenie obvodu. [2]

2.4 Napät'ová nesymetria

Napät'ová nesymetria vstupu U_N je napätie, ktoré je nutné priviesť na vstup operačného zosilňovača, aby výstupné napätie bolo nulové.

$$U_N = U_{vst-} - U_{vst+} \quad pre \quad U_{vyst} = 0 \quad (2.1)$$

U ideálneho operačného zosilňovača je napät'ová nesymetria nulová, u reálneho operačného zosilňovača dosahuje v dôsledku nedokonalosti výroby nenulové hodnoty.

Teplotný drift napät'ovej nesymetrie αU popisuje zmeny napät'ovej nesymetrie s teplotou. Jednotkou je [$\mu V/^\circ C$]. Ak je $\alpha U = 10 \mu V/^\circ C$ a teplota okolia sa zmení o $20^\circ C$, zmení sa vstupná napät'ová nesymetria :

$$U_N = 10 \frac{\mu V}{^\circ C} \cdot 20^\circ C = 200 \mu V = 0,2 mV \quad (2.2)$$

2.5 Prúdová nesymetria

Prúdová nesymetria vstupu I_N je rozdiel prúdov obidvoch vstupov pri nulovom výstupnom napätí.

$$I_N = I_- - I_+ \quad \text{pre } U_{\text{vyst}} = 0 \quad (2.3)$$

Vplyv prúdovej nesymetrie je závislý na veľkosti vnútorných odporov R_i zdrojov napájajúce vstupy operačného zosilňovača. Pri malom R_i má na chybu výstupného napätia operačného zosilňovača prevažujúci vplyv napäťová nesymetria, pri veľkom R_i je rozhodujúca prúdová nesymetria. [1]

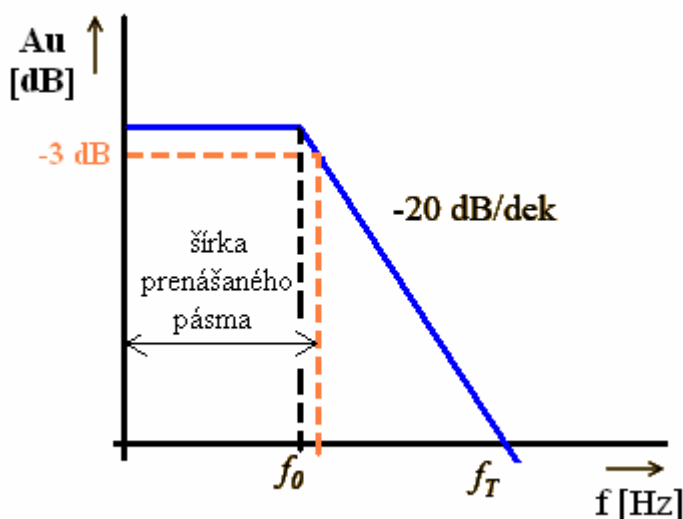
2.6 Vstupný kl'udový prúd

Je to jednosmerný prúd (stredná hodnota), pretekajúci medzi vstupnými svorkami operačného zosilňovača a zemou, pri nulovom vstupnom signály. Výrobca určuje akým spôsobom sa vstupný kl'udový prúd kompenzuje. [2]

$$I_{\text{vst}} = \frac{I_{01} + I_{02}}{2} \quad (2.4)$$

2.7 Frekvenčný rozsah

Šírka prenášaného pásma v ktorom zosilnenie A_u poklesne o 3 dB vzhľadom na hodnotu pri referenčnej frekvencii f_0 . Často sa určuje aj hodnota tranzitnej frekvencie f_t , pri ktorej $A_u(f_t) = 1$. [2]



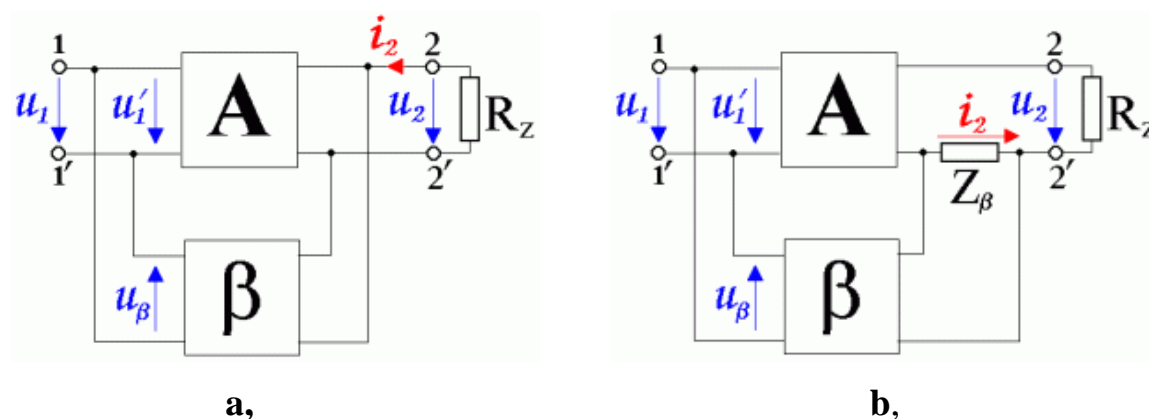
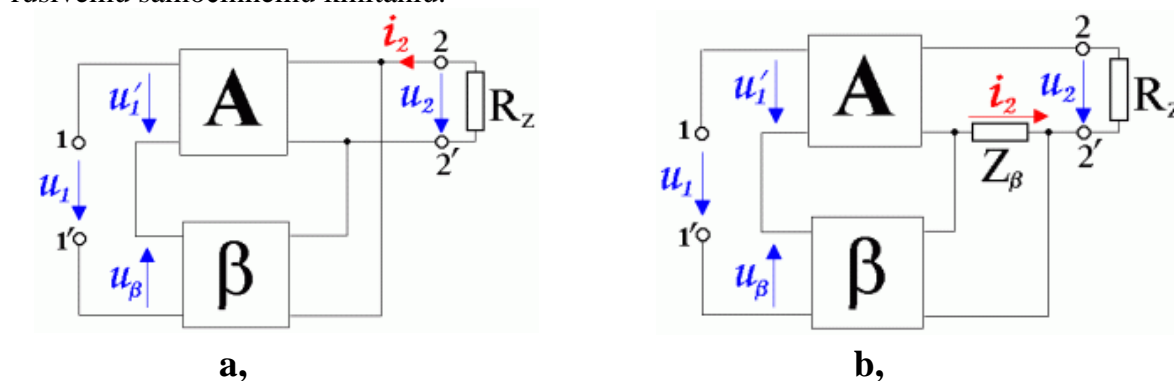
Obr. 2.1: Modulová charakteristika reálneho operačného zosilňovača

3. Spätná väzba v operačných zosilňovačoch

Spätnou väzbou rozumieme takú elektrickú väzbu medzi časťami zosilňovača, pri ktorej sa časť energie zosilneného signálu z výstupu zosilňovača vedie späť na jeho vstup. Podľa veľkosti fázového posunu medzi pôvodným signálom a signálom privedeným z výstupu sa výsledný prenos buď znižuje (vtedy hovoríme o zápornej spätnej väzbe), alebo zväčšuje (vtedy hovoríme o kladnej spätnej väzbe).

- **Záporná spätná väzba**
 - znižuje zosilnenie zosilňovača
 - zväčšuje stabilitu zosilňovača
 - znižuje rušenie a nelineárne skreslenie
 - na vstup sa privádzajú aj zložky rušivého a skresleného signálu – tým sa tieto zložky znižujú
 - znižuje frekvenčné, harmonické aj fázové skreslenie
 - ovplyvňuje vstupnú a výstupnú impedanciu
- **Kladná spätná väzba**
 - zväčšuje zosilnenie zosilňovača
 - za určitých podmienok sa mení zosilňovač na oscilátor
 - ovplyvňuje vstupnú impedanciu

Pretože spätná väzba závisí od frekvencie, môže mať zosilňovač v určitom pásme frekvencií zápornú spätnú väzbu a v inej frekvenčnej oblasti kladnú spätnú väzbu. Preto pri zosilňovači so spätnou väzbou je najväčším problémom jeho stabilita, t.j. odolnosť proti rušivému samočinnému kmitaniu. [2]

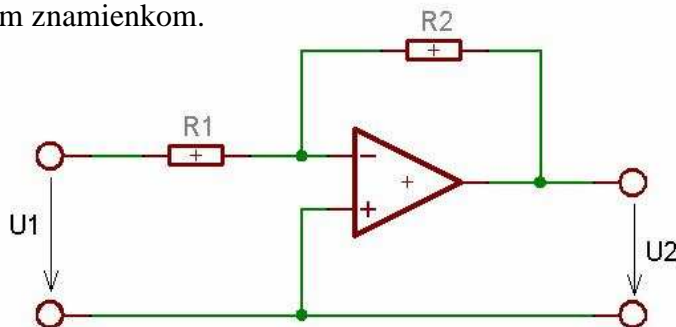


Blok označený písmenom **A** sa nazýva blok zosilnenia. V ňom je sústredené celé, maximálne zosilnenie zosilňovača. Zosilňuje vstupné napätie u_1 na výstupné napätie u_2 . Blok označený písmenom **B** sa nazýva blok spätnej väzby, prostredníctvom ktorého sa dostáva časť napätia z výstupu na vstup zosilňovača. Toto napätie sa označuje ako spätnoväzbové napätie u_B . [2]

4. Základné zapojenia operačných zosilňovačov

4.1 Invertujúci zosilňovač

Operačný zosilňovač vykonáva operáciu obrátenia fázy vstupného napätia. Výstupné napätie má opačnú fázu než vstupné napätie. Vo výraze pred výpočtom napäťového zosilnenia sa to vyjadruje záporným znamienkom.



Obr. 4.1: Zapojenie invertujúceho zosilňovača

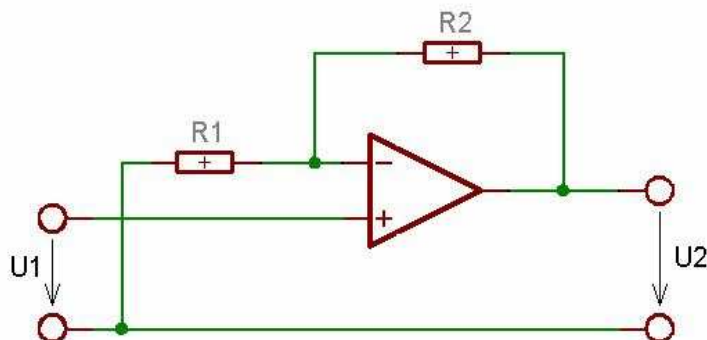
$$U_2 = -U_1 \frac{R_2}{R_1} \quad (4.1)$$

$$A_u = -\frac{R_2}{R_1} \quad (4.2)$$

Signál prichádza do invertujúceho vstupu (-), zatiaľ čo druhý neinvertujúci vstup (+) je uzemnený. Spätný väzobný odpor R2 vedie späť signál na vstup. Je to spätná väzba záporná, ktorá znižuje pôvodné vysoké zosilnenie samotného operačného zosilňovača. Vstupný signál prechádza odporom R1, ktorý svojou veľkosťou zároveň určuje vstupný odpor, ktorým sa invertujúci zosilňovač prejavuje. Výhodou je, že na vstup aj výstup môžeme privádzať kladné aj záporné napätie. [2]

4.2 Neinvertujúci zosilňovač

Operačný zosilňovač vykonávajúci funkciu zosilňujúceho impedančného meniča s veľkým vstupným odporom. Výstupné napätie je vo fáze so vstupným napätím.



Obr. 4.2: Zapojenie neinvertujúceho zosilňovača

$$U_2 = U_1 \frac{R_1 + R_2}{R_1} \quad (4.3)$$

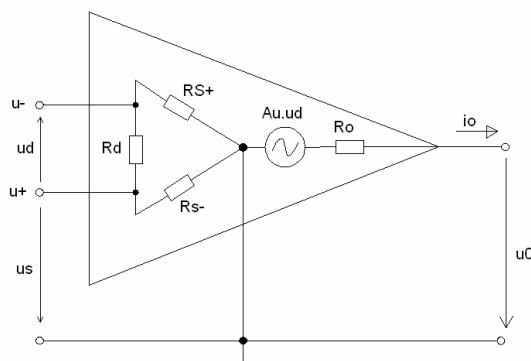
$$A = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (4.3)$$

Vstupné napätie privádzame do neinvertujúceho vstupu označeného ako (+). Druhý vstup v tomto prípade je invertujúci, je pripojený obvykle k odporovému deliču. Tvorí ho odpor R_1 a spätný väzobný odpor R_2 . Výstupný signál je voči vstupnému vo fáze. Ak sa zvyšuje vstupné napätie, zväčšuje sa aj výstupné napätie v rovnakom zmysle. [2]

5. Základné parametre operačných zosilňovačov pre elektrické biologické signály

5.1 Vstupný a výstupný odpor

Diferenčný vstupný odpor R_d je záporne vzatý pomer zmeny diferenčného vstupného napätia a zmeny prúdu neinvertujúceho vstupu nakrátko.



Obr. 5.1: Idealizovaná náhradná schéma operačného zosilňovača

$$R_D = \frac{u_d}{i_+} \quad \text{pre } u_+ = 0 \quad (5.1)$$

Vstupný odpor operačného zosilňovača musí byť aspoň rádovo väčší ako je odpor elektród, cez ktoré sa privádza signál na operačný zosilňovač. $R_d \gg R_{el}$ ($R_d \div 10^6 - 10^{12} \Omega$)
 Výstupný odpor R_0 je odpor, ktorý je na výstupe operačného zosilňovača ak nie je zapojená spätná väzba. Ak je operačný zosilňovač zapojený so zápornou spätnou väzbou napäťovou, hodnota výstupného odporu sa pohybuje pod $0,1 \Omega$. [1]

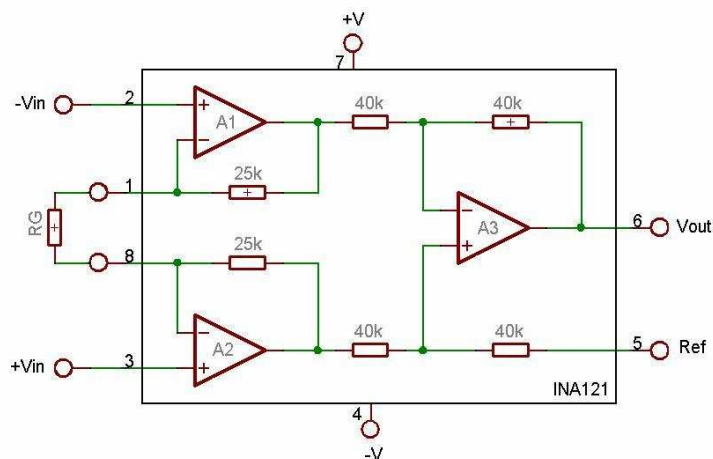
5.2 Meniteľná hodnota napäťového zosilnenia

Napäťové zosilnenie A_u je záporne vzatý pomer zmeny výstupného napätia naprázdno a zmeny diferenčného vstupného napätia pri nulovom súhlasnom vstupnom napätí. [1]

$$A_u = 20 \log \frac{u_0}{u_d} \quad (dB) \quad (5.2)$$

U operačného zosilňovača INA 121 sa veľkosť zisku napäťového zosilnenia mení zmenou odporu R_g .

$$G = 1 + \frac{50k\Omega}{R_g} \quad (5.3)$$

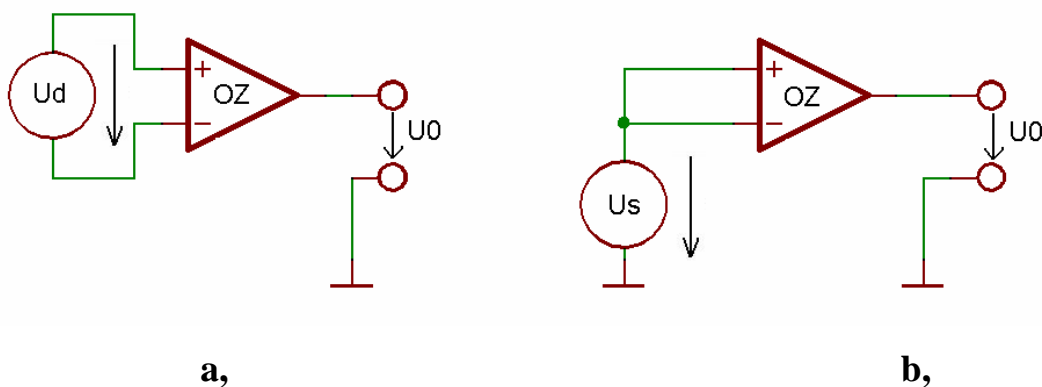


Obr. 5.2: Schéma zapojenia operačného zosilňovača INA 121

5.3 Diskriminačný činiteľ CMR (CMRR)

Diskriminačný činiteľ CMRR je pomer zosilnenia diferenčného signálu Au_d a zosilnenia súhlasného signálu Au_s .

$$CMR = 20 \log \frac{Au_d}{Au_s} \quad (5.4)$$



Obr. 5.3: Zapojenie pre meranie: a) rozdielového zosilnenia b) súhlasného zosilnenia

$$Au_d = \left| \frac{u_0}{u_d} \right| \quad Au_s = \left| \frac{u_0}{u_s} \right| \quad (5.5, 5.6)$$

Hodnota diskriminačného činiteľa sa udáva v [dB]. Pre ideálny operačný zosilňovač hodnota $CMR \rightarrow \infty$. U reálneho operačného zosilňovača sa hodnota CMR pohybuje okolo 100 dB.

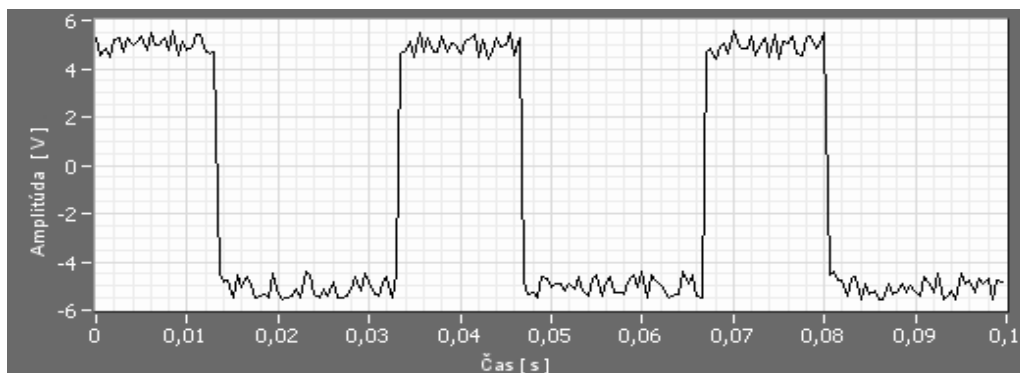
5.4 Nízky šum

Šumy sú nežiaduce napät'ové a prúdové zložky, ktoré inak nesúvisia so signálom. Spektrálne zložky rušivého napätia a prúdu v pásme nad 0,01 Hz nazývame šumy. Často sa udáva spektrálna šumová hustota u_n , i_n zvlášť v pásme frekvencií do 1 kHz, kde prevláda blikavý ($1/f$) šum. [2]

$$u_n = U_n / \sqrt{B} \quad [V/\sqrt{Hz} ; V, Hz] \quad (5.7)$$

$$i_n = I_n / \sqrt{B} \quad [A/\sqrt{Hz} ; A, Hz] \quad (5.8)$$

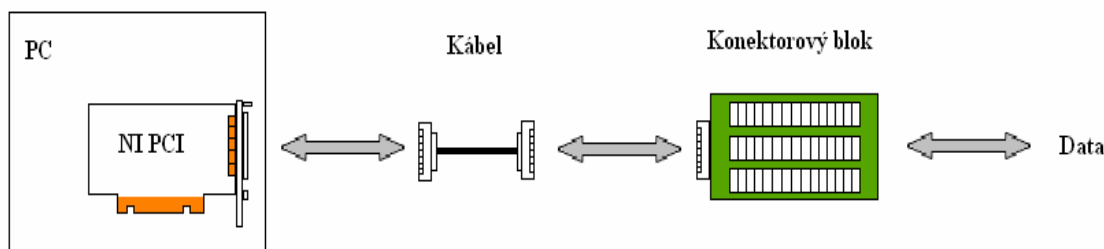
Bšírka pásma v ktorom bol šum U_n , I_n meraný



Obr. 5.4: Priebeh napätia so šumom

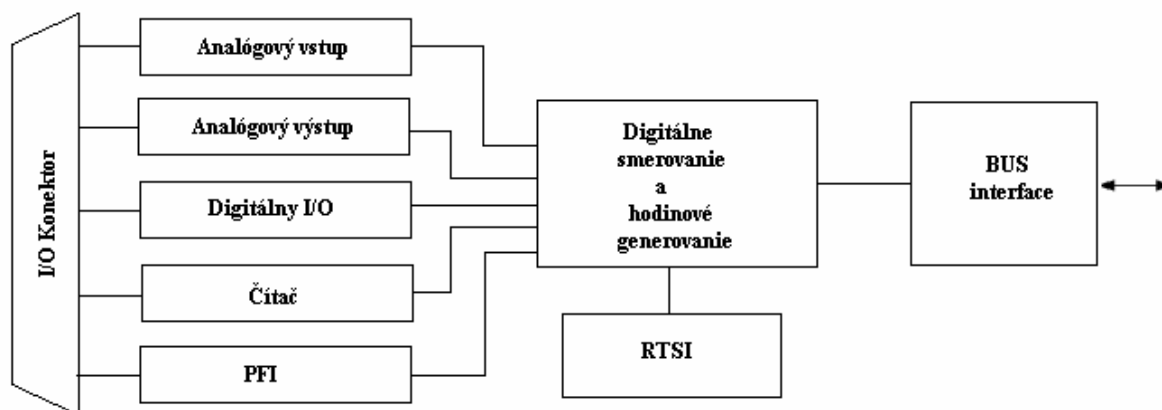
6. Prehľad používaných meracích kariet v laboratóriu na Ústave Biomedicínskeho inžinierstva

NI PCI-6221 a NI PCI-6024E sú meracie karty zo série – M series, sú to zariadenia pomocou ktorých môžeme informácie získavať ale aj odosielať do okolitých zariadení. Nepracujú samostatne, ale s podporou PC, musia sa k nemu pripojiť. Odosielanie a získavanie dát sa sprostredkováva pomocou konektorového bloku, ktorý je pripojený k meracej karte pomocou káblu.



Obr. 6.1: Prepojenie meracej karty ku konektorovému bloku

Meracia karta NI PCI-6221 obsahuje päť blokov, ktoré komunikujú s okolím: analógový vstup, analógový výstup, digitálny vstup - výstup, čítač a PFI. Hlavnými časťami meracej karty sú bloky: digitálne smerovanie a hodinové generovanie a taktiež RTSI, ktoré riadia meraciu kartu.



Obr. 6.2: Bloková schéma meracej karty NI PCI-6221

Meracia karta obsahuje taktiež zbernicový interface, ktorý slúži na pripojenie karty k PC a taktiež vstupno-výstupný konektor, ktorý obsahuje 68 pinov, na ktoré sú pripojené bloky, ktoré komunikujú s okolím. V našej práci budeme využívať len analógový vstup a analógový výstup.

6.1 Presnosť merania meracej karty

NI PCI-6221 :

Presnosť meracej karty sa odkazuje na dva parametre. Prvým parametrom je zvolený napäťový rozsah. Meracia karta má 4 napäťové rozsahy : $\pm 10\text{ V}$, $\pm 5\text{ V}$, $\pm 1\text{ V}$, $\pm 0,2\text{ V}$. Druhým parametrom je rozlišovacia schopnosť A/D prevodníku. A/D prevodník meracej karty NI PCI-6221 na rozlišovaciu schopnosť 16 bitov. Celkovo teda môžeme určiť $2^{16}=65\,536$ hodnôt prevodníku. Ak chceme zmerať čo najpresnejšiu hodnotu, zvolíme napäťový rozsah približný meranému napätiu . Rozlišovaciu schopnosť vypočítame zo vzťahu :

$$RS = \frac{HMR - DMR}{2^b}, \quad (6.1)$$

kde RS rozlišovacia schopnosť

HMR horný merací rozsah

DMR..... dolný merací rozsah

b počet bitov prevodníku

Vstupný rozsah	Rozlišovacia schopnosť
$\pm 10\text{ V}$	$320\text{ }\mu\text{V}$
$\pm 5\text{ V}$	$160\text{ }\mu\text{V}$
$\pm 1\text{ V}$	$32\text{ }\mu\text{V}$
$\pm 0,2\text{ V}$	$6,4\text{ }\mu\text{V}$

Tabuľka 6.1: Rozlišovacie schopnosti meracej karty NI PCI-6221 pre všetky rozsahy.

NI PCI-6024E :

A/D prevodník meracej karty NI PCI-6024E má rozlišovaciu schopnosť 12 bitov. Celkovo teda môžeme určiť $2^{12} = 4\,096$ hodnôt prevodníku. Ak chceme zmerať čo najpresnejšiu hodnotu, zvolíme napäťový rozsah približný meranému napätiu. Rozlišovaciu schopnosť vypočítame zo vzťahu (6.1).

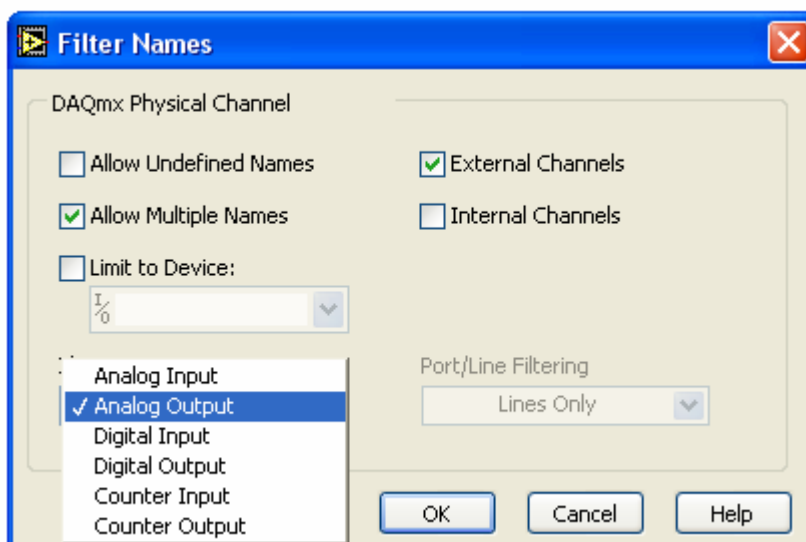
Vstupný rozsah	Rozlišovacia schopnosť
$\pm 10\text{ V}$	$4,88\text{ mV}$
$\pm 5\text{ V}$	$2,44\text{ mV}$
$\pm 0,5\text{ V}$	$0,24\text{ mV}$
$\pm 0,05\text{ V}$	$24,4\text{ }\mu\text{V}$

Tabuľka 6.2: Rozlišovacie schopnosti meracej karty NI PCI-6024E pre všetky rozsahy.

7. Generovanie a meranie napätia pomocou meracej karty a programu LabVIEW 7.1

7.1 Vytvorenie virtuálneho prístroja pre analógový výstup

Prvým krokom je založenie nového projektu. Vytvárame takzvaný virtuálny prístroj (VI). Nový projekt vytvoríme tak, že zvolíme *New* → *Blank VI*. Na obrazovke sa nám otvoria dve okná. Prvým oknom je *Front Panel*, v tomto okne sa vytvára vzhľad virtuálneho prístroja. Druhým oknom je *Block diagram* v ktorom sa vytvára samotný program. Programovanie spočíva v tom, že prepojujeme jednotlivé vložené bloky. Do okna *Front Panel* vložíme blok *DAQmx Physical Channel*. Nájdeme ho v knižnici *Controls* → *I/O* → *DAQmx Name Controls*. Tento blok predstavuje jeden fyzický vstup alebo výstup meracej karty. My chceme využiť jeden z dvoch analógových výstupov. Klikneme na tento blok pravým tlačidlom myši a zvolíme ponuku *I/O Name Filtering*, kde nastavíme typ na *Analógový výstup*.



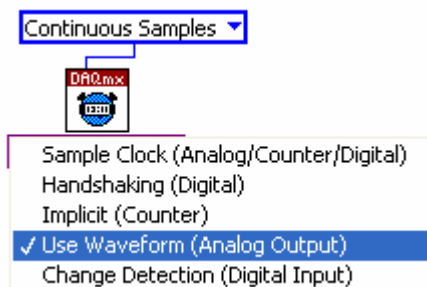
Obr. 7.1: Nastavenie kanálu na analógový výstup

Do okna *Block Diagram* ďalej vložíme blok *DAQmx Creat Virtual Channel*, ktorý nájdeme v knižnici *Functions* → *NI Measurement* → *DAQmx Data Acquisition*. Tento blok nastavíme taktiež na analógový výstup. Pomocou parametrov maximálna a minimálna hodnota nastavíme merací rozsah virtuálneho prístroja.



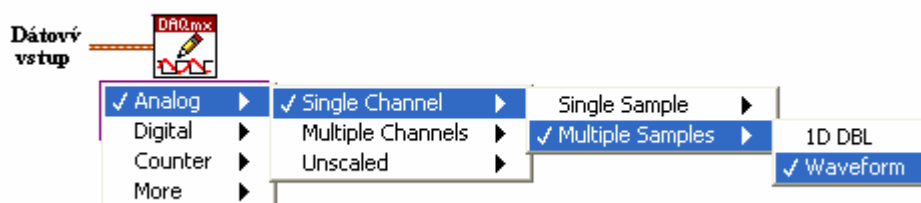
Obr. 7.2: Nastavenie napäťového analógového výstupu bloku DAQmx Creat Virtual Channel

Pre správne generovanie musíme vložiť do projektu časovač *DAQmx Timing*. Nájdeme ho v knižnici *DAQmx Data Acquisition*. Nastavíme ho na mód *Use Waveform* a taktiež nastavíme jeho vzorkovací mód na nepretržité vzorkovanie.



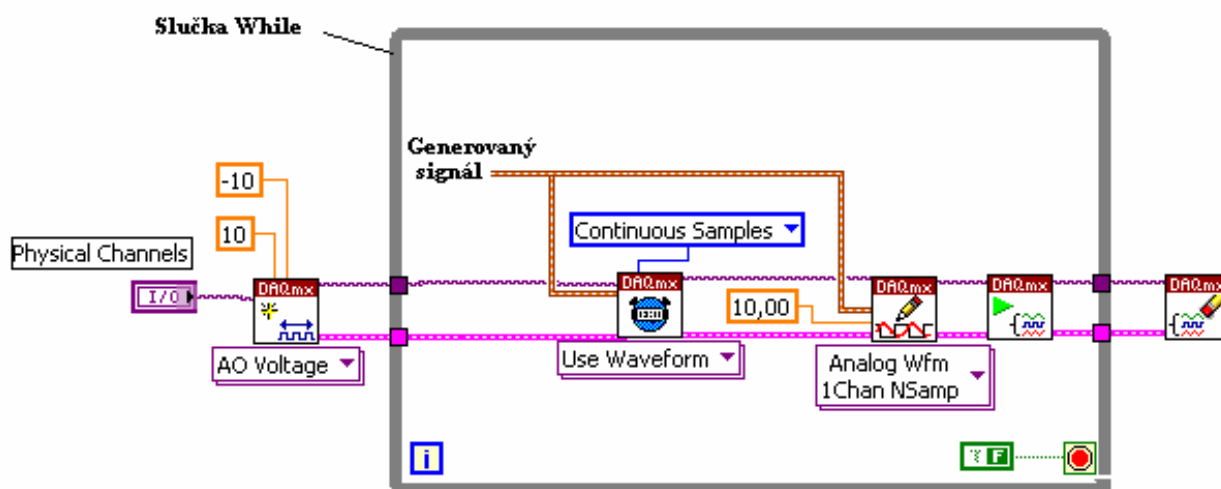
Obr. 7.3: Nastavenie bloku DAQmx Timing pre analógový výstup

Zápis signálu na analógový výstup sa sprostredkováva pomocou bloku *DAQmx Write*. Tento blok nájdeme v knižnici *DAQmx Data Acquisition*. Nastavíme jeho mód na jeden kanál a n vzorkou. Blok obsahuje taktiež dátový vstup, na ktorý sa privádza signál, ktorý sa zapisuje na výstup.



Obr. 7.4: Nastavenie bloku DAQmx Write pre analógový výstup

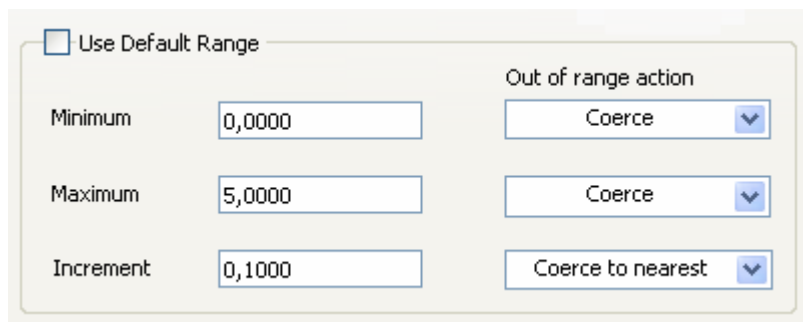
Pre správne vytvorenie a spustenie kanálu vložíme ešte dva bloky, ktoré nájdeme v *DAQmx Data Acquisition*. Sú to bloky *DAQmx Start* a *DAQmx Clear*. Tieto dva bloky majú za úlohu štartovať a mazať kanál. Všetky bloky navzájom poprepájame a tým vytvoríme virtuálny prístroj, ktorý bude zapisovať generovaný signál na výstup. Pre nekonečné zapisovanie vložíme bloky do slučky *While*.



Obr. 7.5: Prepojenie blokov pomocou ktorých zapisujeme generovaný signál

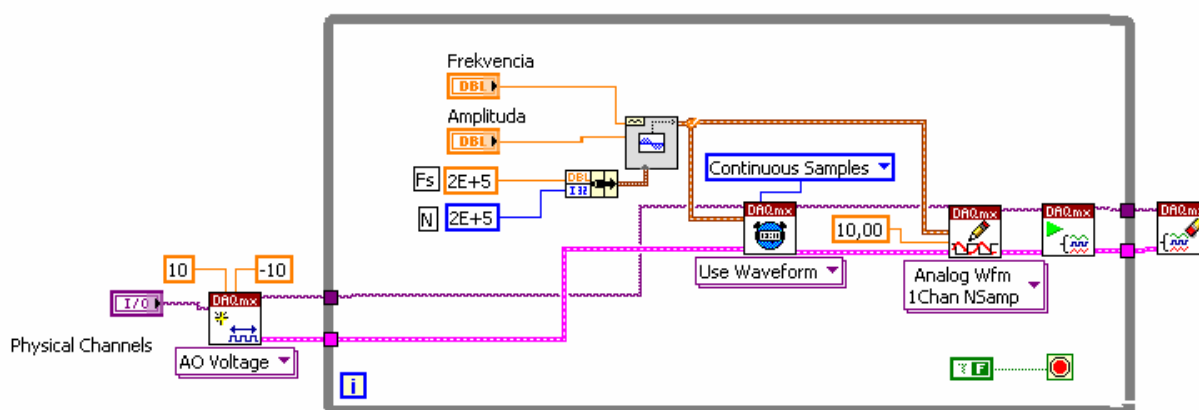
7.2 Vytvorenie generovaného signálu

Chceme generovať harmonický signál, u ktorého budeme chcieť meniť amplitúdu a taktiež frekvenciu signálu. Fázový posun a offset ponecháme na hodnote 0. Do okna Front panel vložíme indikátor *Numeric Control* pre frekvenciu a amplitúdu. Indikátor nájdeme v knižnici *Control* → *Numeric Controls*. Klikneme naň pravým tlačidlom myši a zvolíme vlastnosti. Nastavíme rozsah pre amplitúdu 0-5 V. Krok zväčšenia a zmenšenia nastavíme na hodnotu 0,1V. Pre frekvenciu nastavíme parametre 0 -15 kHz a krok 1 Hz.



Obr. 7.6: Nastavenie parametrov bloku Numeric Control

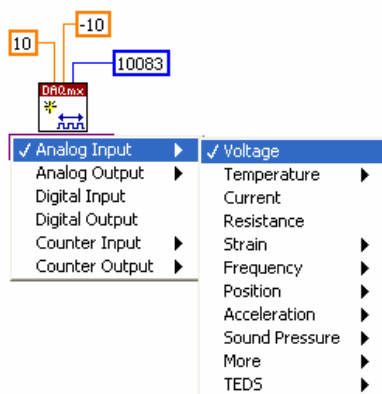
Prepneme sa do okna Block Diagram a vložíme doň blok generujúci harmonický signál. Nájdeme ho v knižnici *Function* → *Waveform* → *Analog Waveform* → *Waveform Generation* → *Sine Waveform*. Aby sme mohli vygenerovať signál s väčšou frekvenciou, musíme nastaviť dostatočne veľkú vzorkovaciu frekvenciu a počet vzorkou na kanál. Vzorkovacia frekvencia musí byť väčšia alebo rovná dvojnásobku generovaného signálu. Nastavenie vzorkovacej frekvencie prevedieme tak, že vložíme do okna Block diagram blok *Bundle*, ktorý nájdeme v knižnici *Function* → *Cluster*. Nastavíme ho na dva vstupné parametre. Prvým parametrom je vzorkovacia frekvencia a druhým parametrom je počet vzorkou na kanál. Tieto dve hodnoty nastavíme na konštantu 200 000. Výstup z bloku *Bundle* prepojíme so vstupom *Sampling info* na generátore harmonického napätia.



Obr. 7.7: Zapojenie generujúce a zapisujúce harmonický signál na analógový výstup

7.3 Vytvorenie virtuálneho prístroja pre analógový vstup

Do okna Front Panel vložíme blok *DAQmx Physical Channel*. Nájde ho v knižnici *Controls* → *I/O* → *DAQmx Name Controls*. Tento blok predstavuje jeden fyzický vstup alebo výstup meracej karty. My chceme využiť jeden z dvoch analógových výstupov. Klikneme naň pravým tlačidlom myši a zvolíme ponuku *I/O Name Filtering*, kde nastavíme typ na *Analógový vstup*. Do okna *Block Diagram* ďalej vložíme blok *DAQmx Creat Virtual Channel*, ktorý nájdeme v knižnici *Functions* → *NI Measuremet* → *DAQmx Data Acquisition*. Tento blok nastavíme na analógový vstup. Pomocou parametrov maximálna a minimálna hodnota nastavíme merací rozsah merania.

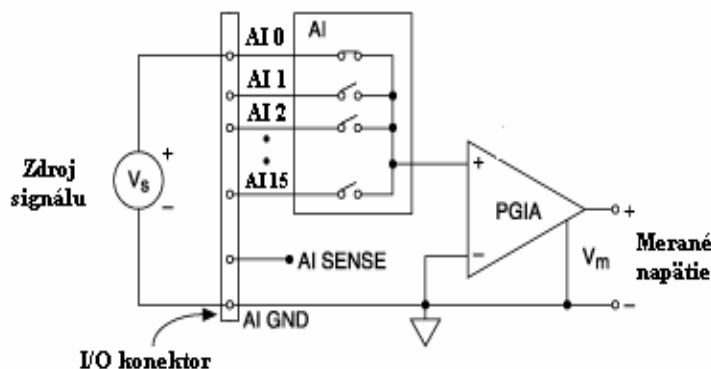


Obr. 7.8: Nastavenie napäťového analógového vstupu bloku DAQmx Creat Virtual Channel

Pri tomto bloku musíme nastaviť taktiež terminálové zapojenie, ktoré udáva piny analógového vstupu, na ktoré sa privádza merané napätie. V našej úlohe môžeme využívať dve zapojenia.

7.3.1 RSE zapojenie analógového vstupu

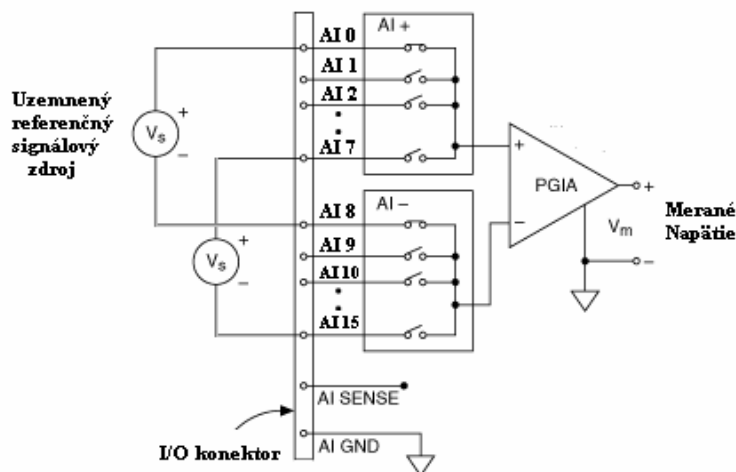
RSE zapojenie je uvažované pre plávajúci signálny zdroj, kde zariadenie poskytne bod referenčnej zeme pre externý signál. Signál sa pripojí na jeden z analógových vstupov a na zem analógového vstupu podľa obrázka (7.9). Konštantná hodnota pre toto zapojenie je 10083. Túto hodnotu nastavíme do bloku *DAQmx Creat Virtual Channel* podľa obrázku (7.8).



Obr. 7.9: RSE zapojenie analógového vstupu

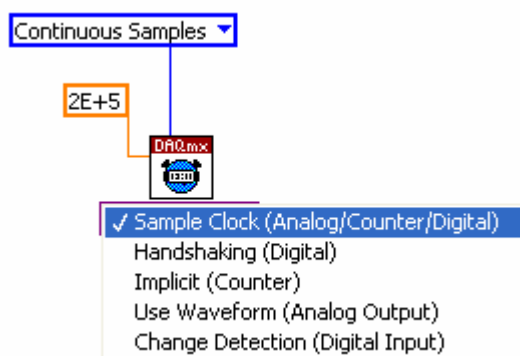
7.3.2 Diferenčné zapojenie analógového vstupu

Pri diferenčnom zapojení sa meraný signál privedie na dva piny analógového vstupu. Sú to kladné a záporné piny. Meracia karta NI PCI – 6221 má 16 analógových vstupov a z toho 8 kladných a 8 záporných. Kladné piny sú AI 0 – AI 7 a záporné AI 8 – AI 15. Meraný signál sa zapojí na prvý kladný a prvý záporný pin, čím môžeme dosiahnuť celkovo 8 zapojení. Konštantná hodnota pre toto zapojenie je 10106.



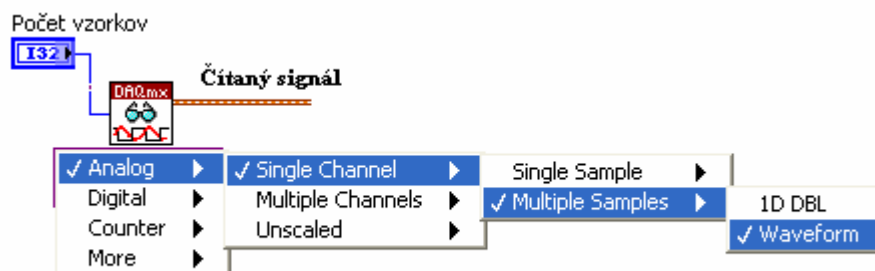
Obr. 7.10: Diferenčné zapojenie analógového vstupu

Pre správne načítanie signálu, musíme vložiť do projektu časovač *DAQmx Timing*. Nájdeme ho v skupine blokov *DAQmx Data Acquisition*. Nastavíme vzorkovací mód na *Sample Clock*, jeho vzorkovací mód na nepretržité vzorkovanie a pomocou konštanty nastavíme vzorkovaciu frekvenciu na hodnotu 200 000.



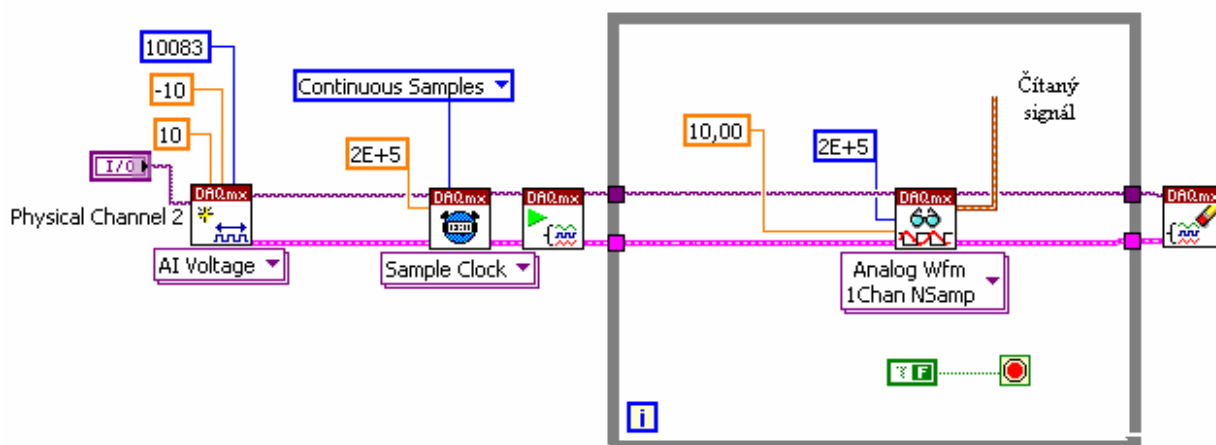
Obr. 7.11: Nastavenie Bloku DAQmx pre analógový vstup

Čítanie signálu na analógovom vstupe sa sprostredkováva pomocou bloku *DAQmx Read*. Tento blok nájdeme v *DAQmx Data Acquisition*. Nastavíme jeho mód na jeden kanál a N vzorkou. Tento blok obsahuje taktiež dátový výstup, kde sa zobrazuje signál, ktorý sa číta na analógovom vstupe. Pomocou konštanty nastavíme taktiež hodnotu počtu vzorkou na 200 000.



Obr. 7.12: Nastavenie bloku DAQmx Read pre analógový vstup

Pre správne vytvorenie a spustenie kanálu vložíme ešte dva bloky, ktoré nájdeme v *DAQmx Data Acquisition*. Sú to bloky *DAQmx Start* a *DAQmx Clear*. Tieto dva bloky majú za úlohu štartovať a mazať kanál. Všetky bloky navzájom poprepájame a tým vytvoríme virtuálny prístroj, ktorý bude načítavať signál. Pre nekonečné načítavanie vložíme bloky do slučky *While*.



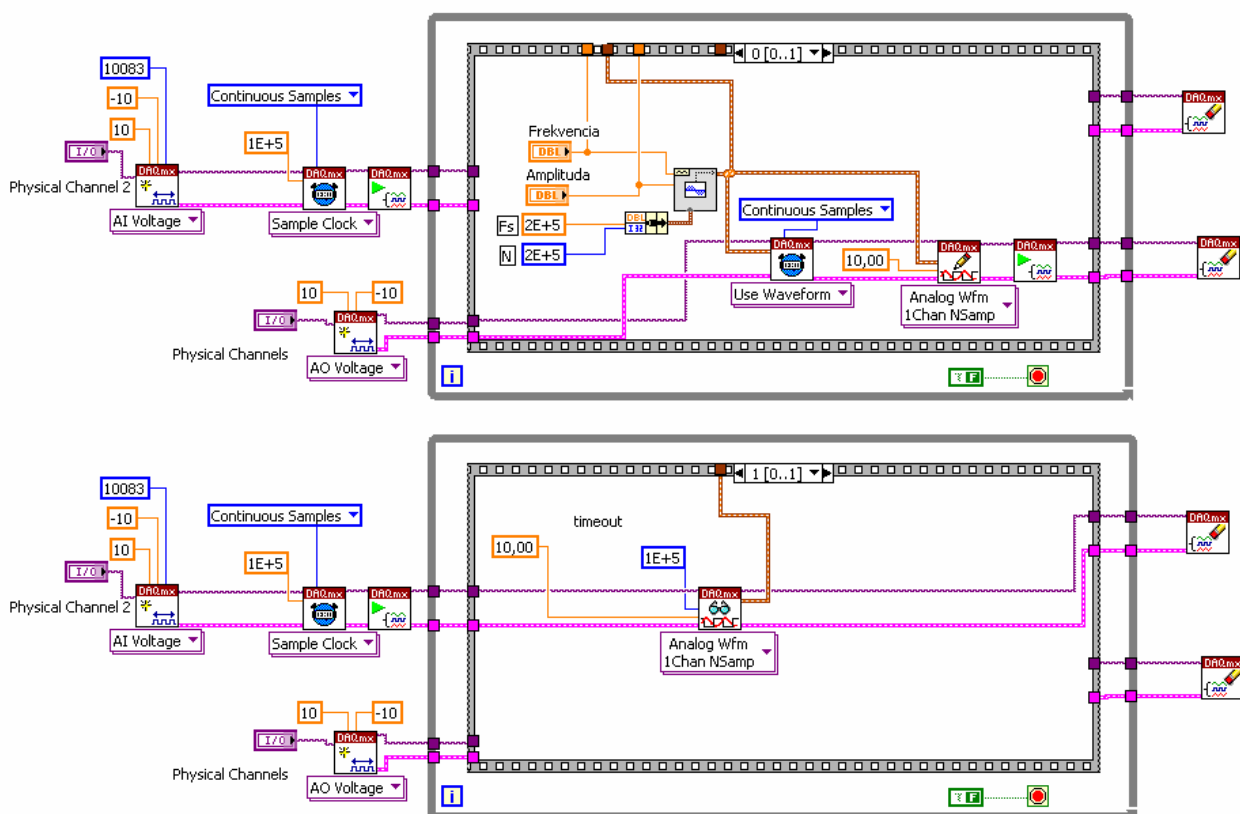
Obr. 7.13: Zapojenie, ktoré načítava signál na analógovom vstupe

8. Meranie frekvenčnej charakteristiky

Frekvenčná charakteristika je závislosť napäťového zosilnenia A_u [dB] od zmeny frekvencie meraného signálu. Zosilnenie dostaneme ako podiel výstupného napätia meraného bloku a vstupného napätia meraného bloku. Hodnotu v dB dostaneme ak tento podiel zlogaritmujeme a následne vynásobíme konštantou 20.

$$A_u = 20 \log \frac{U_{vyst}}{U_{vst}} \quad (8.1)$$

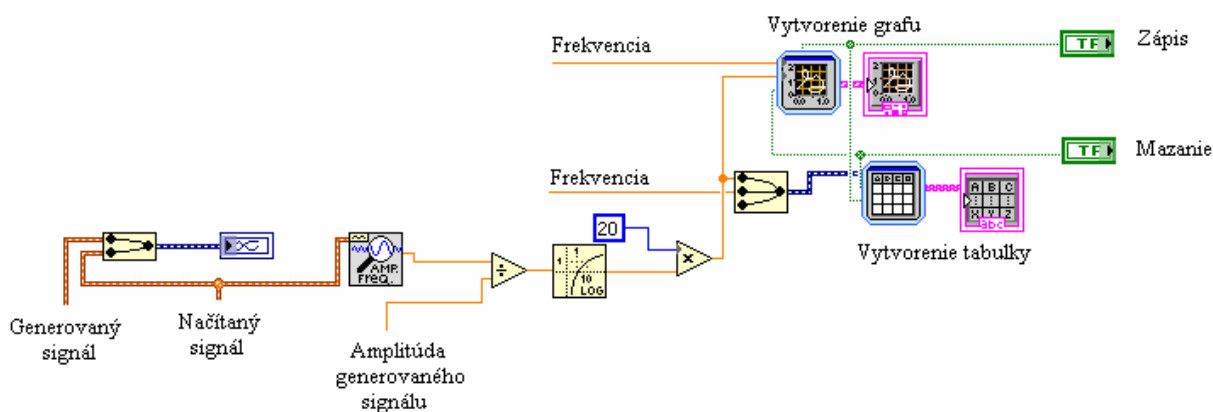
Aby sme mohli zmerať frekvenčnú charakteristiku, potrebujeme vygenerovať signál, ktorý privedieme na vstup meraného bloku a taktiež potrebujeme zmerať odozvu na výstupe meraného bloku. Toto dokážeme pomocou virtuálnych prístrojov, ktoré sme vopred vytvorili. Tieto prístroje potrebujeme zlúčiť do jedného celku, ktorý bude postupne generovať a následne čítať signál. Do okna Blok diagram vložíme štruktúru *Sequence*, ktorá vykonáva postupne jednotlivé sekvencie podľa toho, ako ich programátor nastaví. Túto štruktúru nastavíme tak, aby sa v prvom kroku generoval signál a v druhom načítaval. Prepojenie jednotlivých blokov v štruktúre *Sequence* a slučky *While* sa prevedie podľa obrázka (8.1).



Obr. 8.1: Virtuálny prístroj, ktorý generuje a následne číta signál pre jednotlivé sekvencie

Do okna blok diagram vložíme blok, ktorý nám detekuje amplitúdu odozvy meraného objektu. Nájde ho v *Function* → *Waveform* → *Analog waveform* → *Waveform Measurement* → *Extract Single Tone Information*. Pomocou bloku *Device* podelíme amplitúdu odozvy a amplitúdu generovaného harmonického signálu, ktorý nájde v knižnici *Function* → *Numerick*, tento podiel zlogaritmujeme pomocou bloku *Logarithm Base 10* a následne vynásobíme konštantou 20 pomocou bloku *Multipli*.

Vykreslenie grafu vytvoríme pomocou *XY Graph* a to tak, že sa k jednotlivým frekvenciám priradí hodnota zosilnenia. Pomocou tlačidla *Zápis* budeme zakresľovať graf a pomocou tlačidla *Mazanie* mazať graf. Pre zobrazenie hodnôt, ktoré sa zapisujú do tabuľky použijeme blok *Expres Tabl*, kde opäť budeme zapisovať a mazať hodnoty pomocou tlačidiel. Aby sme mohli do tabuľky vkladať hodnoty dvoch parametrov, musíme tieto dva signály zlúčiť do jedného. Prevedieme ich pomocou bloku *Merge Signal*, ktorý nájde v *Function* → *Signal manipulation*.

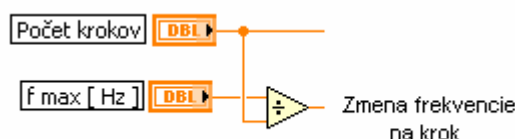


Obr. 8.2: Výpočet, zápis a vykreslenie napäťového zosilnenia

9. Automatizované meranie frekvenčnej charakteristiky

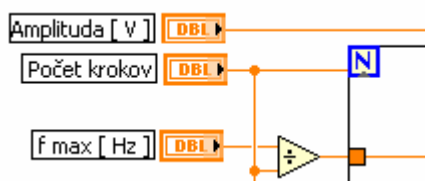
Automatizované meranie je meranie, pri ktorom si program počas merania samostatne mení parametre bez zásahu odbornej osoby. V našej práci požadujeme, aby si program samostatne menil frekvenciu generovaného harmonického signálu. Amplitúda, fázový posun a offset generovaného signálu sa počas programu nesmú meniť.

Prvým krokom je vytvorenie nového projektu (VI). Do okna *Front Panel* vložíme tri bloky, pomocou ktorých budeme zadávať parametre, určujúce chod programu. Po spustení programu sa nebude môcť s týmito blokmi manipulovať. Prvým vstupným parametrom je amplitúda, ktorej hodnoty zadávame vo voltoch. Druhým parametrom je maximálna frekvencia, do ktorej sa bude frekvenčná charakteristika merať. Tretím parametrom je počet krokov. Pomocou parametrov maximálna frekvencia a počet krokov určíme veľkosť zmeny frekvencie na jeden krok.



Obr. 9.1: Zapojenie blokov pre veľkosť zmeny frekvencie na jeden krok v okne Block Diagram

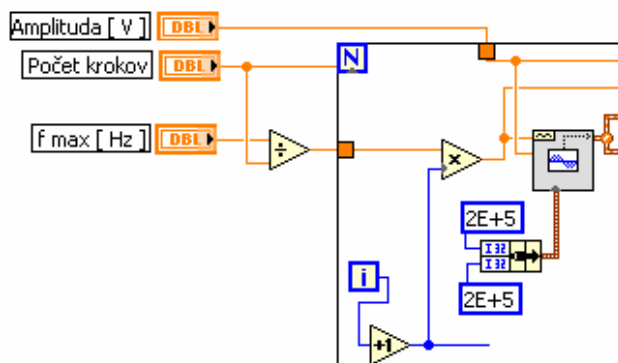
Celý program bude bežať v štruktúre *For Loop*, ktorú nájdeme v knižnici *Functions* → *Structures*. Táto štruktúra má obdobu v programe C++ ako cyklus *for*. Pomocou vstupného parametru počet krokov nastavíme počet cyklov pre túto štruktúru.



Obr. 9.2: Nastavenie počtu opakovaní pre štruktúru For Loop

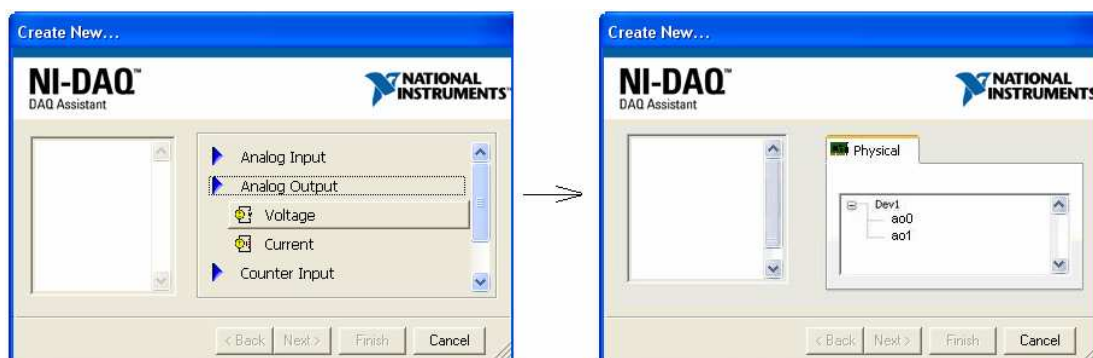
Do okna *Block Diagram* vložíme blok generujúci harmonický signál. Nájdeme ho v knižnici *Function* → *Waveform* → *Analog Waveform* → *Waveform Generation* → *Sine Waveform*. Aby sme mohli vygenerovať signál s väčšou frekvenciou, musíme nastaviť dostatočne veľkú vzorkovaciu frekvenciu a počet vzorkou na kanál. Vzorkovacia frekvencia musí byť väčšia alebo rovná dvojnásobku generovaného signálu. Nastavenie vzorkovacej frekvencie prevedieme tak, že vložíme do okna *Block Diagram* blok *Bundle*, ktorý nájdeme v *Function* → *Cluster*. Nastavíme ho na dva vstupné parametre. Prvým parametrom je vzorkovacia frekvencia a druhým parametrom je počet vzorkou na kanál. Tieto dve hodnoty nastavíme na konštantu 200 000. Výstup z bloku *Bundle* prepojíme zo vstupom *Sampling info* na generátore harmonického napätia.

Zmena frekvencie nastane vždy po inkrementácii štruktúry *For Loop*. Veľkosť nastavenej frekvencie určíme ako súčin aktuálne sa vykonávajúceho kroku a veľkosti zmeny frekvencie na jeden krok. Aktuálne sa vykonávajúci krok je zväčšený o hodnotu jedna, aby sme pri nultom kroku negenerovali signál o frekvencii 0 Hz.



Obr. 9.3: Zapojenie generujúce harmonický signál

Zápis generovaného harmonického signálu na analógový výstup prevedieme pomocou bloku *DAQ Assistant*, ktorý nájdeme v knižnici *DAQmx* → *Data Acquisition*. Po vložení bloku do okna *Block Diagram* sa zobrazí okno *Create new*, v ktorom vytvoríme potrebný kanál pre napäťový analógový výstup. Po výbere a potvrdení sa dostaneme do okna v ktorom vyberieme fyzický kanál meracej karty.



Obr. 9.4: Vytvorenie napäťového analógového výstupu

Po výbere fyzického kanála sa dostávame do okna *DAQ Assistant*, v ktorom nastavíme merací rozsah kanálu, režim generovania (*Continuous*) a zaškrtneme políčko *Use timing from waveform data*. Na vstup bloku *DAQ Assistant* privedieme generovaný harmonický signál.

Čítanie signálu prevedieme taktiež pomocou bloku *DAQ Assistant*, ktorý nastavíme na napäťový analógový vstup. Vyberieme fyzický kanál meracej karty. V okne *DAQ Assistant* zvolíme merací rozsah, terminálové zapojenie (*RSE*) a typ vzorkovania (*n Sample*).



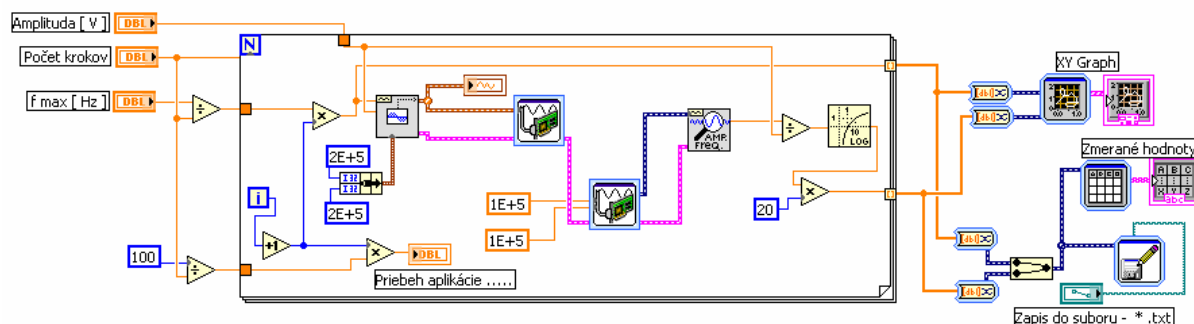
Obr. 9.5: Vytvorenie napäťového analógového vstupu

Pre správny chod programu musíme nastaviť prioritu vykonávania jednotlivých blokov. Požadujeme, aby sme v prvom kroku generovali harmonický signál, v druhom ho zapisovali na fyzický kanál, v treťom kroku načítavali odozvu meraného objektu a vo štvrtom kroku zmerali veľkosť amplitúdy. Zabezpečíme to pomocou prepojenia chybových hlásení.



Obr. 9.6: Prepojenie chybových hlásení

Blok *DAQ Assistant* (analogový vstup) obsahuje výstup, na ktorom sa objaví načítaná odozva signálu. Z tejto odozvy určíme amplitúdu pomocou bloku *Extract Single Tone Information*. Pomocou bloku *Device* podelíme amplitúdu odozvy a amplitúdu generovaného harmonického signálu, tento podiel zlogaritmujeme pomocou bloku *Logarithm Base 10* a následne vynásobíme konštantou 20 pomocou bloku *Multipli*. Všetky tieto bloky sa nachádzajú v štruktúre *For Loop*. Vypočítané hodnoty napäťového zosilnenia sa ukladajú do *Shift registrov*, odkiaľ sa následne po skončení všetkých cyklov zapisujú do tabuľky a grafu. Vykreslenie grafu vytvoríme pomocou *XY Graph* a to tak, že sa k jednotlivým frekvenciám priradí hodnota zosilnenia. Pre zobrazenie hodnôt, ktoré sa zapisujú do grafu použijeme blok *Expres Table*. Aby sme mohli do tabuľky vkladať hodnoty dvoch parametrov, musíme ich zlúčiť do jedného. Prevedieme ich pomocou bloku *Merge Signals*, ktorý nájdeme v knižnici *Function* → *Signal manipulation*.



Obr. 9.7: Virtuálny prístroj, ktorý premeria automatizovane frekvenčnú charakteristiku

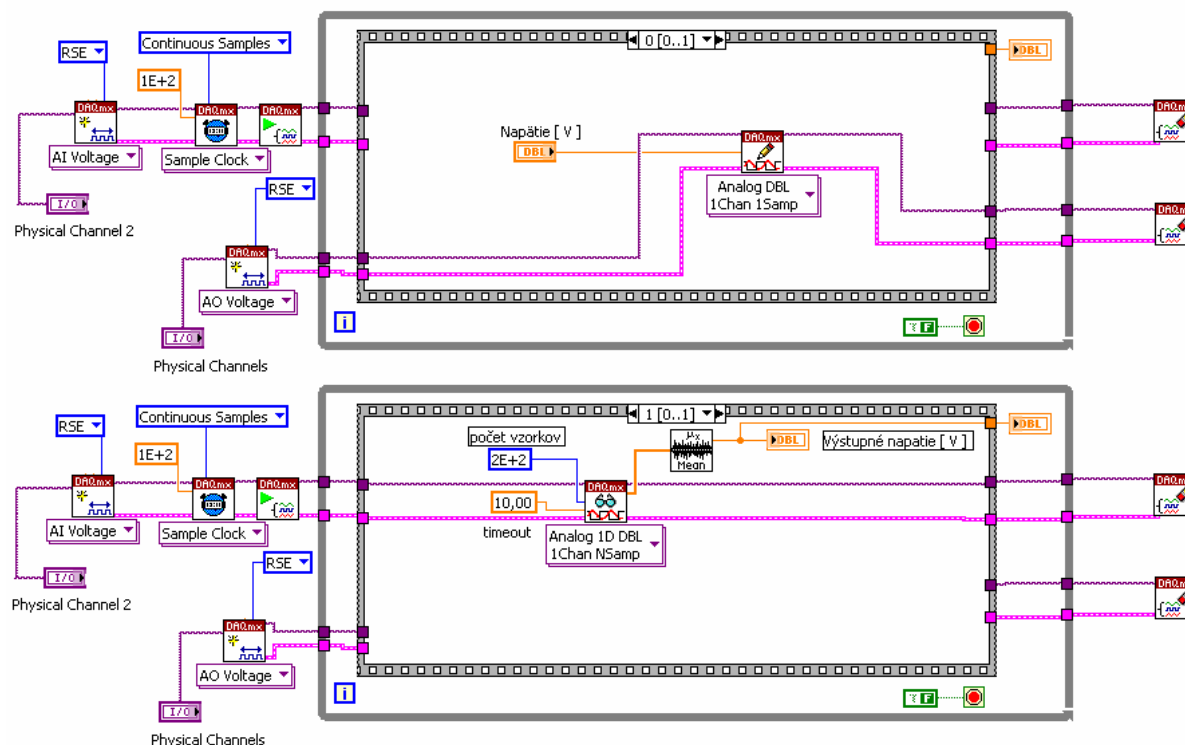
10. Meranie napät'ovej nesymetrie

Pre meranie napät'ovej nesymetrie využijeme opäť vopred vytvorené virtuálne prístroje pre generovanie a načítanie signálu. Pre správny chod programu musíme upraviť parametre niektorých blokov. Pri generovaní napätia musíme nastaviť blok *DAQ Write*. Nastavíme jeho mód na jeden kanál a jednu vzorku. Tým zabezpečíme, že počas celého načítavania odozvy v jednom cykle nekonečnej slučky bude generované napätie konštantné, rovné nastavenému z *Front Panelu*. Pri načítavaní odozvy nastavíme vzorkovaciu rýchlosť bloku *DAQmx Timing* na 100 Hz a počet vzorkov bloku *DAQmx Read* na 200.

Pre presnejšie meranie spriemerujeme všetky vzorky. Prevedieme to pomocou bloku *Mean*, ktorý nájdeme v knižnici *Probability and statistics*, ktorý matematicky prepočíta priemernú hodnotu podľa vzorca (10.1)

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} X_i, \quad (10.1)$$

kde μ je priemerná hodnota, n je počet vzorkou a X sú hodnoty jednotlivých vzorkou.

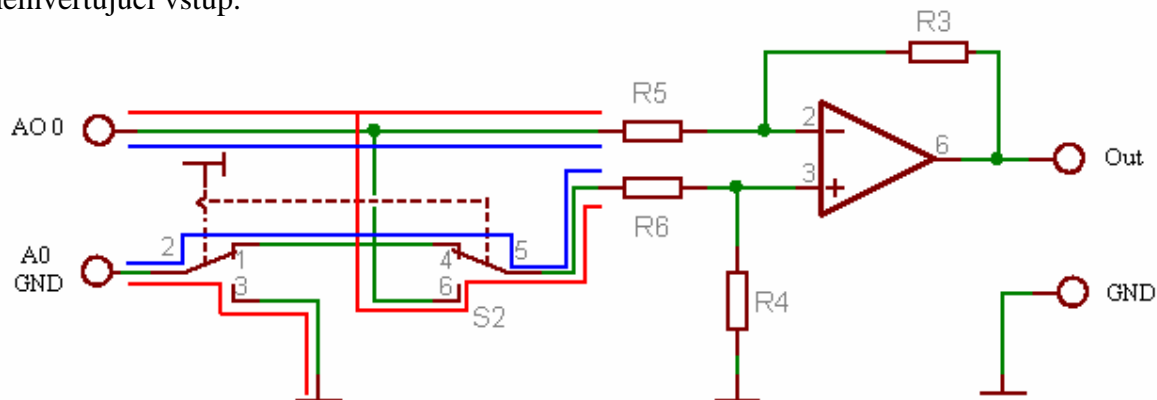


Obr. 10.1: Virtuálny prístroj , ktorý premeria napät'ovú nesymetriu

Pomocou takto zostaveného programu môžeme merať napät'ovú nesymetriu dvoma spôsobmi. Prvý spôsob je ten, že privedieme na vstup operačného zosilňovača nulovú hodnotu generovaného signálu a na výstupe načítavame hodnotu napät'ovej nesymetrie. Druhý spôsob je ten, že na vstup operačného zosilňovača privádzame nenulovú hodnotu generovaného napätia tak, aby sme na výstupe načítali nulové napätie (blížiac sa k nule). Hodnota napät'ovej nesymetrie je rovná veľkosti generovaného napätia.

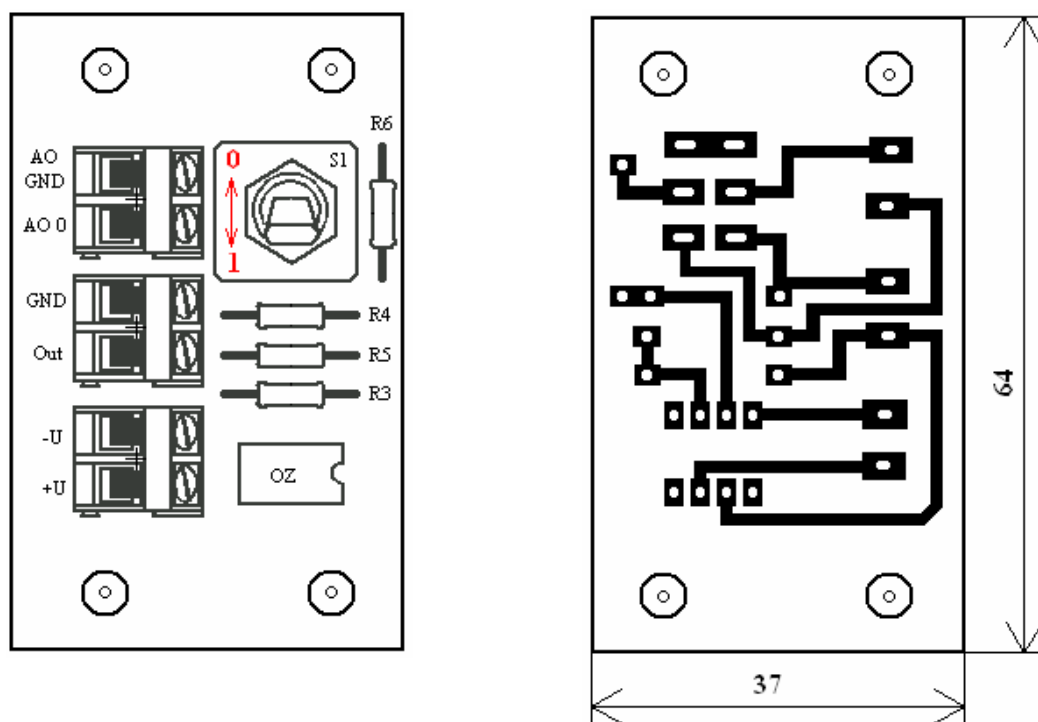
11. Meranie diskriminačného činiteľa CMR

Pre meranie diskriminačného činiteľa operačného zosilňovača potrebujeme poznať diferenciálne a súhlasné zosilnenie zosilňovača. Jednotlivé zosilnenia sa merajú pri rôznych zapojeniach a kvôli tomu sme zostrojili merací prípravok. Na prípravku je zapojený prepínač, pomocou ktorého budeme prepínať jednotlivé zapojenia. Schému zapojenia prípravku nájdeme na obrázku (11.1). Operačný zosilňovač má na prípravku diferenciálne zapojenie. Hodnoty všetkých odporov sú rovnaké, čím sme zaistili rovnaké zosilnenie pre invertujúci aj neinvertujúci vstup.



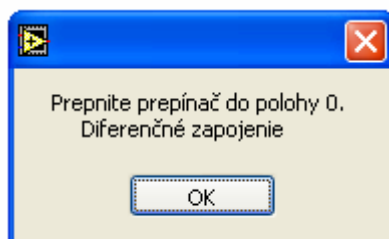
Obr. 11.1: Schéma zapojenia prípravku

Prepojenie na prípravku je zakreslená zelenou farbou. Po prepnutí prepínača do polohy 0, prepojíme zapojenie do diferenciálneho zapojenia, ktoré je naznačené modrou farbou. Ak prepneme prepínač do polohy 1, prepojíme zapojenie do súhlasného zapojenia, ktoré je naznačené červenou farbou.



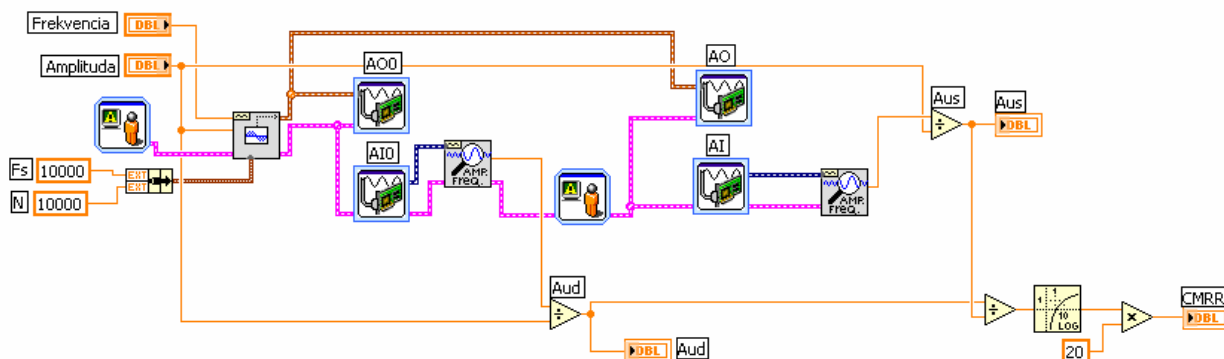
Obr. 11.2: Rozloženie súčiastok na prípravku

V prvom kroku musíme zadať amplitúdu harmonického signálu a frekvenciu, pri ktorej budeme merať diskriminačný činiteľ. Následne musí program upozorniť na to, či je prípravok v diferenciálnom zapojení (poloha 0). Upozornenie sa prevádza pomocou oknového hlásenia. Ak je prípravok v polohe 0, stlačí sa tlačidlo OK a program pokračuje podľa naprogramovania. Ak nie je, treba ho prepnúť. Oknové hlásenie nastavíme pomocou bloku *Display Message to user*, ktorý nájdeme v knižnici *Time & Dialog*. Hlavnou úlohou tohto bloku je pozastaviť program, pokiaľ nie je stlačené tlačidlo OK.



Obr. 11.3: Oknové hlásenie

V treťom kroku musíme vygenerovať harmonický signál, zapísať ho na výstup a načítať odozvu. Pre zápis a načítanie odozvy použijeme *DAQ Assistant*-ov. Tým zjednodušíme a sprehládneme celkové zapojenie. Nastavíme vzorkovaciu frekvenciu 1000 Hz a 5000 vzorkou. Z načítaného signálu odčítame amplitúdu a určíme diferenciálne zosilnenie. Vo štvrtom kroku sa zobrazí opäť oknové hlásenie na prepnutie zapojenia. Prepínač prepneme do polohy 1 - súhlasné zapojenie. V ďalšom kroku musíme opäť zapísať harmonický signál na výstup a načítať odozvu. Z načítaného signálu odčítame amplitúdu a vypočítame súhlasné zosilnenie. V poslednom kroku vypočítame hodnotu diskriminačného činiteľa podľa vzťahu (5.4).

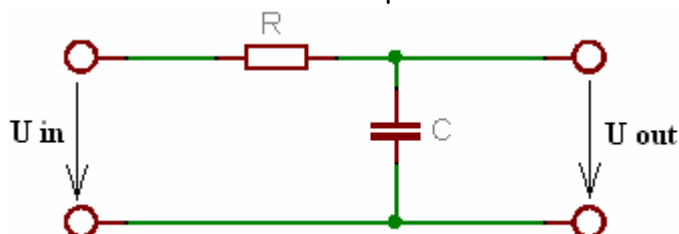


Obr. 11.4: Virtuálny prístroj merajúci diskriminačný činiteľ

12. Testy aplikácií na reálnych zapojeniach

12.1 Meranie frekvenčnej charakteristiky

Aplikáciu na meranie frekvenčnej charakteristiky sme overovali na dvoch zapojeniach. Prvým zapojením bol dolnopriepustný filter typu RC. Filter bol zapojený na nepájavom poli. Hodnoty súčiastok sme volili: $R = 5\text{k}\Omega$ a $C = 1\text{ }\mu\text{F}$.

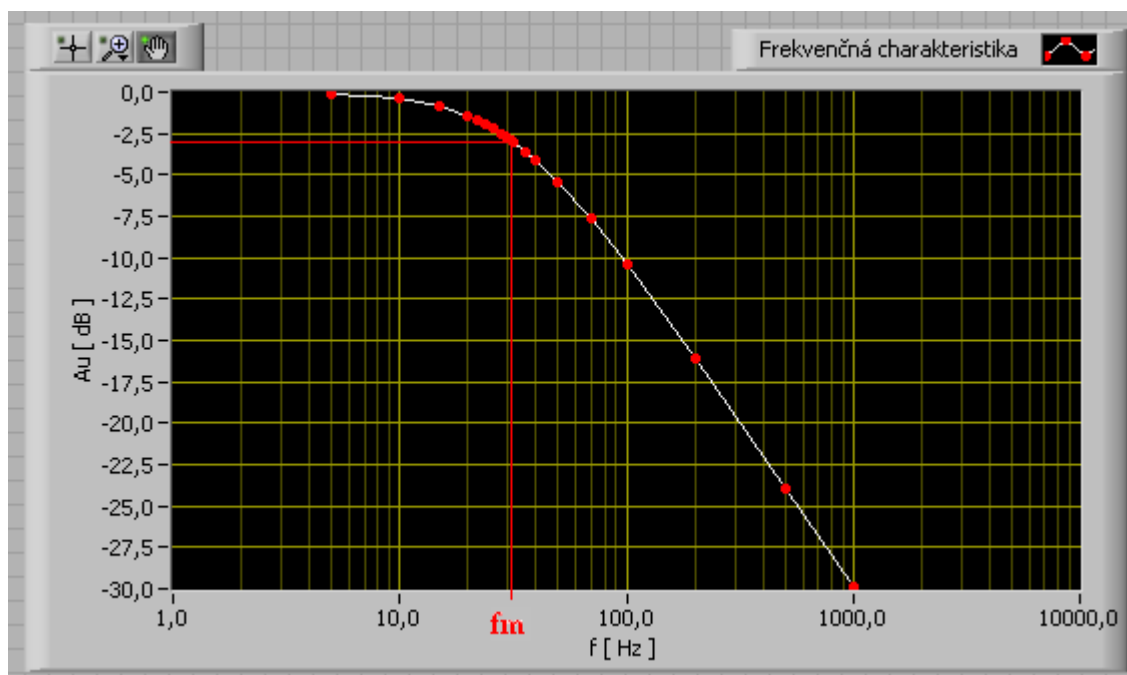


Obr. 12.1: Dolnopriepustný filter RC

Napätie U_{in} je generované napätie meracej karty, napätie U_{out} je načítavané meracou kartou. Vypočítali sme medznú hodnotu frekvencie podľa vzťahu :

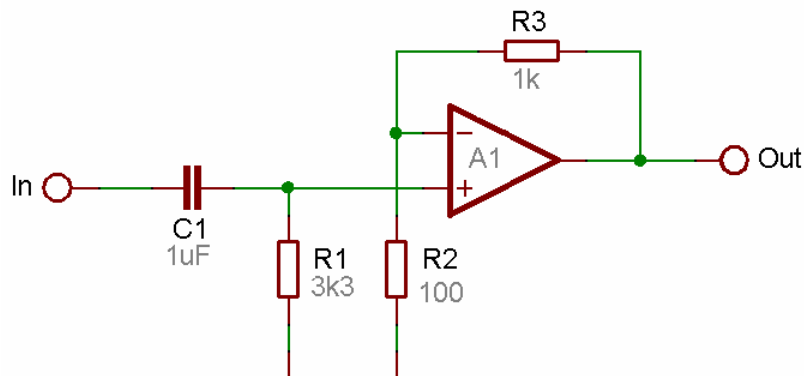
$$f_m = \frac{1}{2\pi RC} = 31,4\text{ Hz} \quad (12.1)$$

Z charakteristiky, ktorú sme dostali po premeraní aplikáciou, sme odčítali medznú frekvenciu, ktorá mala hodnotu $f_{mm} = 31,6\text{ Hz}$. Rozdiel vypočítanej a zmeranej frekvencie bol $0,2\text{ Hz}$ pri meracom rozsahu $\pm 5\text{V}$.



Obr. 12.2: Zmeraná frekvenčná charakteristika dolnopriepustného filtru typu RC

Druhým zapojením bol hornopriepustný filter a neinvertujúci operačný zosilňovač. Toto zapojenie sa využíva ako vstupný zosilňovač pri meraní korotkovových zvukov. Obvod bol zapojený na nepájavom poli.



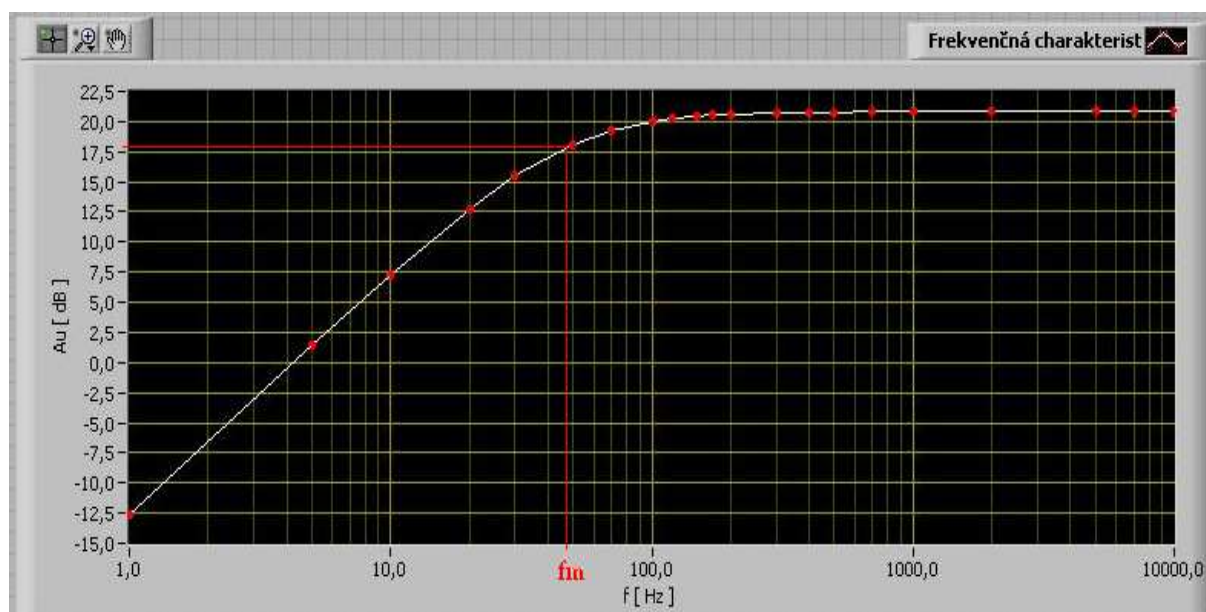
Obr. 12.3: Vstupný zosilňovač používaný pri meraní korotkovových zvukoch

Pomocou pasívnych súčiastok sme nastavili zosilnenie operačného zosilňovača a medznú frekvenciu podľa vzťahov :

$$A = 1 + \frac{R_3}{R_2} = 11 \quad (12.2)$$

$$f_m = \frac{1}{2 \pi R C} = 47,08 \text{ Hz} \quad (12.3)$$

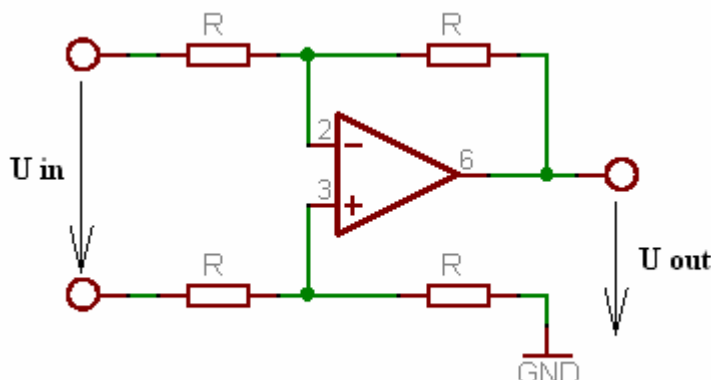
Z charakteristiky, ktorú sme dostali po premeraní aplikáciou, sme odčítali medznú frekvenciu, ktorá mala hodnotu $f_{mm} = 47 \text{ Hz}$. Rozdiel vypočítanej a zmeranej frekvencie bol 0,08 Hz pri meracom rozsahu $\pm 1 \text{ V}$.



Obr. 12.4: Zmeraná frekvenčná charakteristika vstupného zosilňovača používaného pri meraní korotkovových zvukov

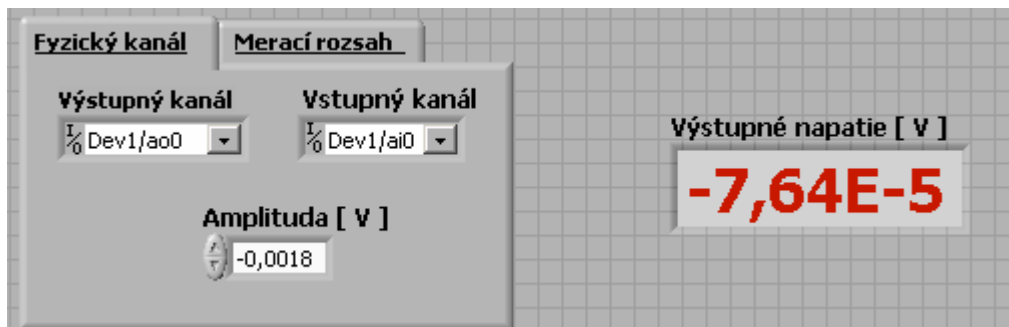
12.2 Meranie napät'ovej nesymetrie

Aplikáciu na meranie napät'ovej nesymetrie sme overovali na diferenčnom zapojení operačného zosilňovača LM 741. Meranie sa prevádzkalo na skonštruovanom výrobku.



Obr. 12.5: Diferenčné zapojenie operačného zosilňovača

Napätie U_{in} je generované napätie meracou kartou, U_{out} je načítavané meracou kartou. Výrobca udáva katalógovú hodnotu napät'ovej nesymetrie v rozmedzí od 1 do 5 mV. Po premeraní sme zistili, že veľkosť vstupného napätia U_{in} musí byť 1,8mV, aby sa výstupné napätie značne blížilo k nulovej hodnote. Aplikáciou zmeraná hodnota odpovedá katalógovým údajom výrobcu.



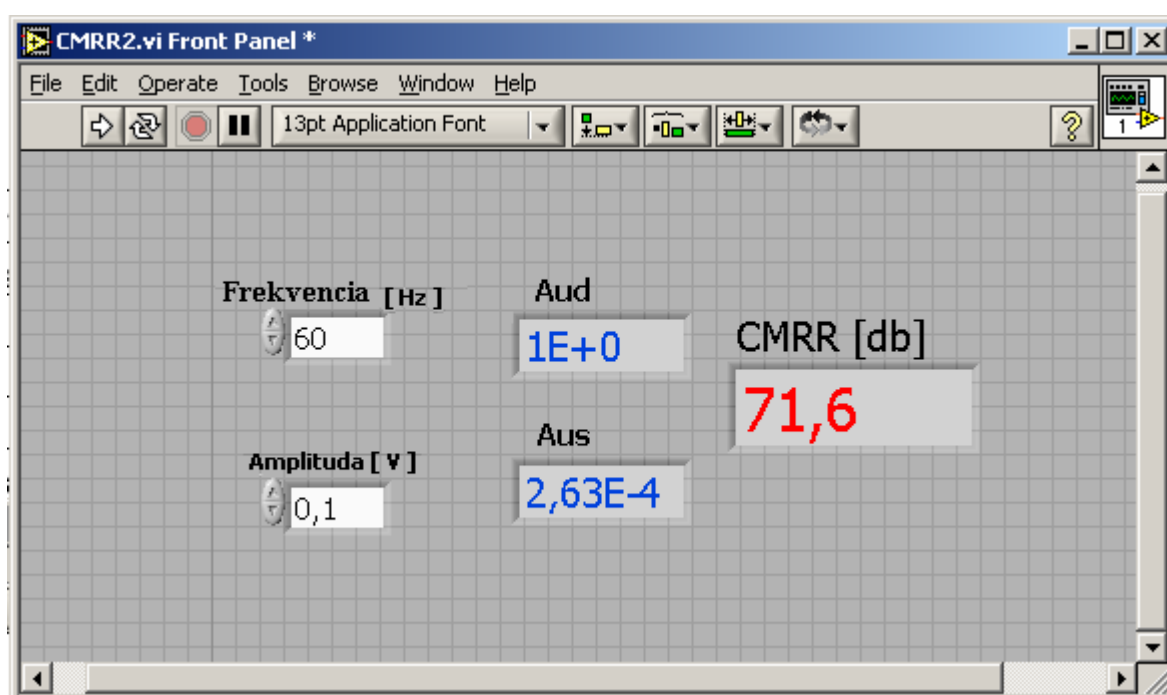
Obr. 12.6: Nameraná hodnota napät'ovej nesymetrie

12.3 Meranie diskriminačného činiteľa CMR

Meranie sme prevádzali na skonštruovanom výrobku, ktorého zapojenie je na obrázku (11.1). Hodnotu CMR sme premerali na troch operačných zosilňovačoch: LM741, LM748 a LF351. Parametre generovaného signálu sme volili : $f = 60 \text{ Hz}$ a $U_{\text{amp}} = 0,1 \text{ V}$.

Typ zosilňovača	Katalógové údaje výrobcu	Zmeraná hodnota
LM 741C	70-90 dB	85,8 dB
LM 748	70-90 dB	71,6 dB
LF351	70-100 dB	72,3 dB

Tabuľka 12.1: Porovnanie katalógových údajov a zmeraných hodnôt aplikáciou



Obr. 12.7: Užívateľské rozhranie aplikácie merajúcej diskriminačný činiteľ

13. Záverečné vyhodnotenie

V tejto práci sme sa oboznámili s parametrami operačných zosilňovačov používaných pri meraní biologických signálov. Jednotlivé operačné zosilňovače sme vyhľadali na internete a spravili prehľad ich parametrov a taktiež vnútorných zapojení. Ku každému zapojeniu sme pridali aj vzorec pre výpočet napäťového zosilnenia. Tento prehľad nájdete v prílohe.

V ďalšom kroku sme sa oboznámili s meracími kartami NI PCI-6221 a NI PCI-6024E, ktoré sa používajú v laboratóriu na Ústave Biomedicínskeho inžinierstva. Pre jednotlivé meracie karty sme vypočítali citlivosť hodnoty napätia, ktorú je možné zmerať, na jednotlivých meracích rozsahov. Výpočet a tabuľku hodnôt nájdete v kapitole 6.

Pomocou meracej karty a programu LabVIEW 7.1 sme vytvorili štyri programy, ktorými sa premerajú jednotlivé parametre.

Prvý program premeria frekvenčnú charakteristiku operačných zosilňovačov. Našou úlohou bolo vytvoriť program, ktorý sa bude využívať pri vyučovaní. Program je vytvorený tým spôsobom, že študenti musia premerať charakteristiku a to tak, že zadávajú hodnoty frekvencie a pomocou tlačidla „Zápis“ sa vykresľuje postupne charakteristika a súčasne sa zapisujú hodnoty do tabuľky.

Druhý program premeriava takisto frekvenčnú charakteristiku ale automatizovane. Zmenu frekvencie, zápis zmeraných hodnôt do súboru a vykreslenie charakteristiky vykonáva program samostatne. Správnosť chodu programov sme overovali na RC článku a vstupnom zosilňovači ktorý sa používa pri meraní korotkovových zvukov.

Tretí program premeriava napäťovú nesymetriu. Študent musí zadávať hodnoty vstupného napätia tak, aby na výstupe bolo nulové napätie (blížiace sa k nule). Správnosť chodu programu sme overovali na diferenčnom zapojení operačného zosilňovača LM741.

Štvrtý program premeriava hodnotu diskriminačného činiteľa. Počas priebehu merania musíme presne prepínať prepínač na skonštruovanom výrobku pre správne meranie. Správnosť chodu programu sme overovali na troch operačných zosilňovačoch.

Všetky premerané charakteristiky a parametre operačných zosilňovačov boli v rozmedzí katalógových údajov výrobcu.

Skonštruovaný výrobok bol navrhnutý hlavne pre meranie CMR. Tento výrobok sa dá využiť aj pri meraní napäťovej nesymetrie, taktiež v zapojeniach, ktoré využívajú diferenčné zapojenie operačného zosilňovača.

14. Použitá literatúra a internetové stránky

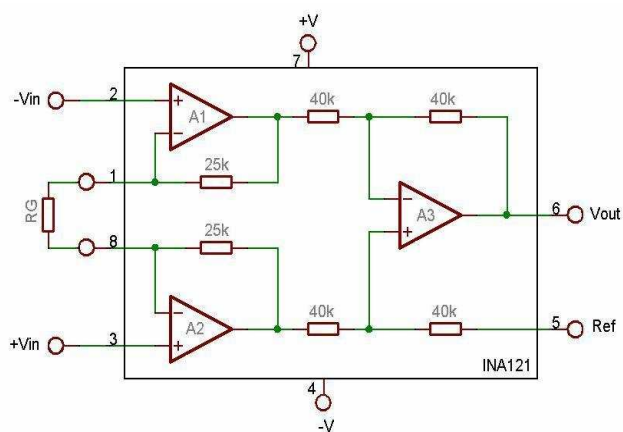
- [1] Jiří Dostál , Operační zosilovače , BEN-Technická Literatura , Praha 2005
- [2] Jozef Punčochář , Operační zosilovače v elektronice , BEN-Technická Literatura Praha 2002
- [3] <http://www.datasheetcatalog.com>
- [4] <http://www.gme.cz>
- [5] <http://www.burr-brown.com>
- [6] <http://www.ti.com>
- [7] <http://www.analog.com>
- [8] <http://www.ni.com>

15. Príloha

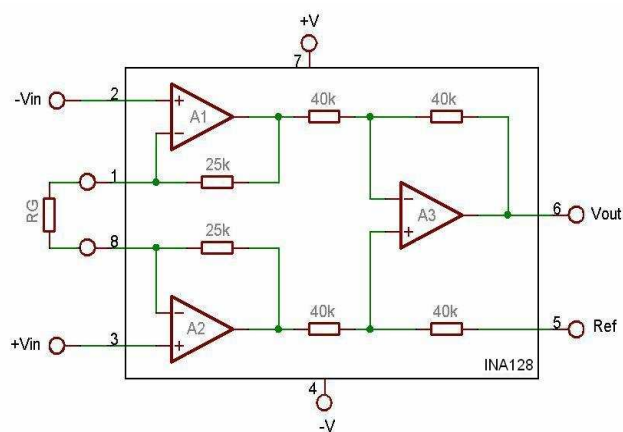
	INA 121	INA 128	OPA 111	AD 620	INA101 AG	AMP 04	INA 321
Vstupný kludový Prúd [nA]	0,004	5	0,001	1	15	30	10
Vstupný odpor [Ω]	10^{12}	10^{10}	10^{13}	10^9	10^{10}	$4 \cdot 10^9$	10^{13}
Vstupné offsetové napätie [μ V]	200	50	150	30	25	150	200
Vstupný offsetový drift [μ V/ $^{\circ}$ C]	2	0,5	1	0,6	0,25	3	7
Šum pri f=1kHz [nV/ \sqrt Hz]	20	8	8	9	13	30	100
CMR [dB]	106	120	120	100	106	100	94
Napájanie [V]	$\pm 2,25$ ± 18	$\pm 2,25$ ± 18	± 5 ± 15	$\pm 2,3$ ± 18	± 15 V	± 18	$\pm 2,7$ $\pm 5,5$
Maximál- ny rozdiel vstupných napätí [V]	± 40	± 40	–	± 25	–	± 36	–
Výrobca	Texas Instru- ment	Texas Instru- ment	Texas Instru- ment	Analog Devices	Texas Instru- ment	Analog Devices	Texas Instru- ment
Cena [\$]	3,55	4,95	19,15	3,14	2,3	6,52	1,1
Puzdro	DIP S0-8	DIP S0-8	T0-99	DIP N-8	TO-100	DIP N-8	MSOP-8

[3 – 7]

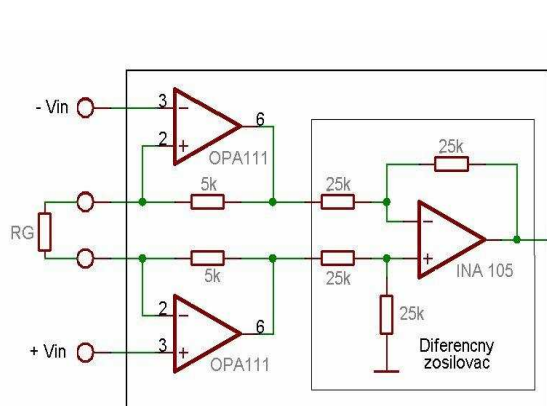
Tabuľka 15.1: Katalógové parametre operačných zosilňovačov používaných pre meranie biologických signálov



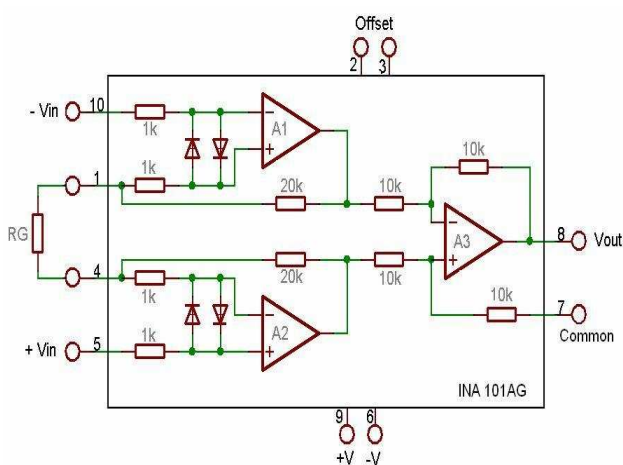
INA121



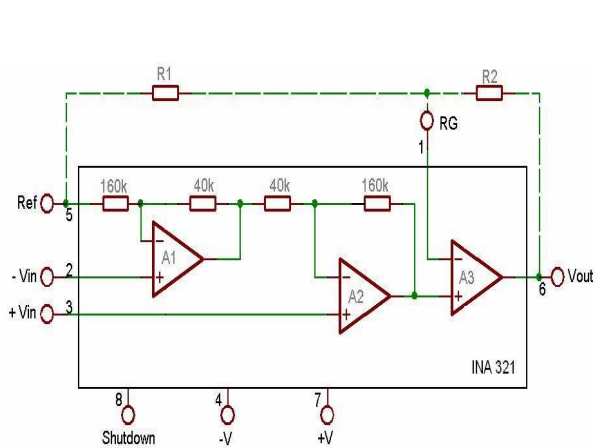
INA128



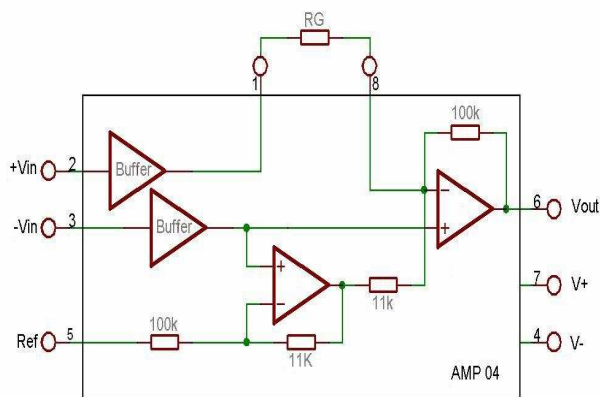
Zapojenie zosilňovača s OPA111



INA 101AG

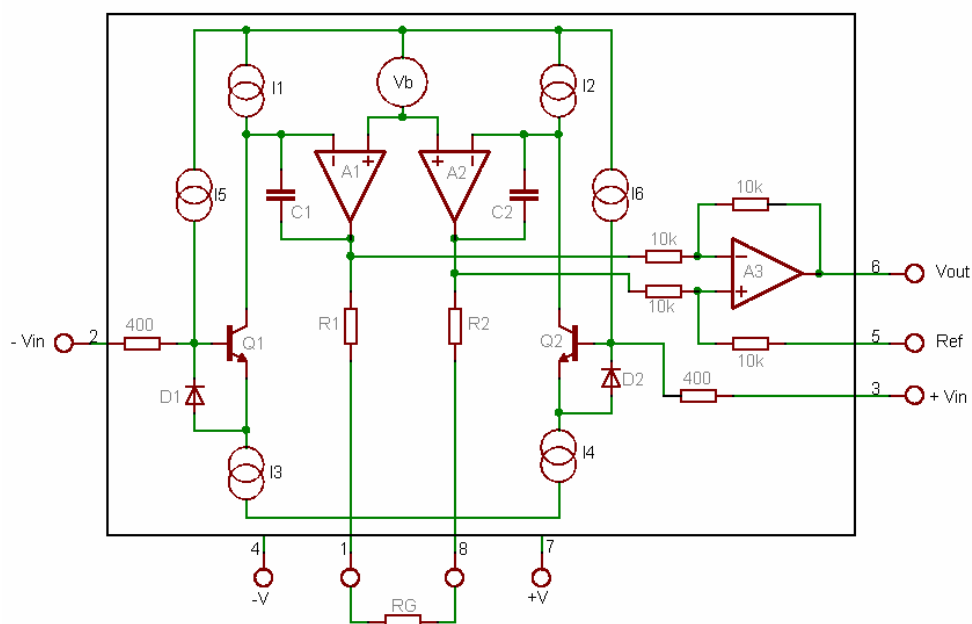


INA 321



AMP 04

Obr. 15.1: Vnútorne štruktúry operačných zosilňovačov používaných pri meraní elektrických biologických signálov



Obr. 15.2: Vnútna štruktúra operačného zosilňovača AD 620

Typ zosilňovača	Nastavenie zosilnenia	Typ zosilňovača	Nastavenie zosilnenia
INA 121	$G = 1 + \frac{50 \text{ k}\Omega}{R_G}$	AMP 04	$G = \frac{100 \text{ k}\Omega}{R_G}$
INA 128	$G = 1 + \frac{50 \text{ k}\Omega}{R_G}$	AD 620	$G = 1 + \frac{R_1 + R_2}{R_G}$
INA 101	$G = 1 + \frac{40 \text{ k}\Omega}{R_G}$	OPA 111	$G = 1 + \frac{2 R_F}{R_G}$
INA 321	$G = 5 + 5 \cdot \frac{R_2}{R_1}$		

[3 – 7]

Tabuľka 15.2: Nastavenie zosilnenia pre jednotlivé operačné zosilňovače

Parametre / Meracia karta		NI PCI-6221	NI PCI-6024E
Analogový vstup	Počet kanálov	16	16
	Vzorkovacia rýchlosť	250 kS/s	200 kS/s
	Rozlíšenie	16 bitov	12 bitov
	Max. napäťové hodnota	±10 V	±10 V
	Rozsah presností	3,1 mV	16,504 mV
	Rozsahová citlivosť	320 µV	4,8 mV
	Min. napäťové hodnota	±0,2 V	±0,05 V
	Rozsah presností	0,112 mV	0,106 mV
	Rozsahová citlivosť	6,4 µV	24,4 µV
	Počet meracích rozsahov	4	4
Analogový výstup	Počet kanálov	2	2
	Vzorkovacia rýchlosť	250 kS/s	10 kS/s
	Rozlíšenie	16 bitov	12 bitov
	Max. napäťové hodnota	±10 V	±10 V
	Rozsah presností	3,23 mV	8,127 mV
	Rozsahová citlivosť	3,23 mV	---
	Min. napäťové hodnota	±10 V	±10 V
	Rozsah presností	3,23 mV	8,127 mV
	Rozsahová citlivosť	3,23 mV	---
Výrobca		National Instruments	

Tabuľka 15.3: Parametre meracích kariet používaných v laboratóriu na Ústave biomedicínskeho inžinierstva

AI 0	68	34	AI 8
AI GND	67	33	AI 1
AI 9	66	32	AI GND
AI 2	65	31	AI 10
AI GND	64	30	AI 3
AI 11	63	29	AI GND
AI SENSE	62	28	AI 4
AI 12	61	27	AI GND
AI 5	60	26	AI 13
AI GND	59	25	AI 6
AI 14	58	24	AI GND
AI 7	57	23	AI 15
AI GND	56	22	AO 0
AO GND	55	21	AO 1
AO GND	54	20	NC
D GND	53	19	P0.4
P0.0	52	18	D GND
P0.5	51	17	P0.1
D GND	50	16	P0.6
P0.2	49	15	D GND
P0.7	48	14	+5 V
P0.3	47	13	D GND
PFI 11/P2.3	46	12	D GND
PFI 10/P2.2	45	11	PFI 0/P1.0
D GND	44	10	PFI 1/P1.1
PFI 2/P1.2	43	9	D GND
PFI 3/P1.3	42	8	+5 V
PFI 4/P1.4	41	7	D GND
PFI 13/P2.5	40	6	PFI 5/P1.5
PFI 15/P2.7	39	5	PFI 6/P1.6
PFI 7/P1.7	38	4	D GND
PFI 8/P2.0	37	3	PFI 9/P2.1
D GND	36	2	PFI 12/P2.4
D GND	35	1	PFI 14/P2.6

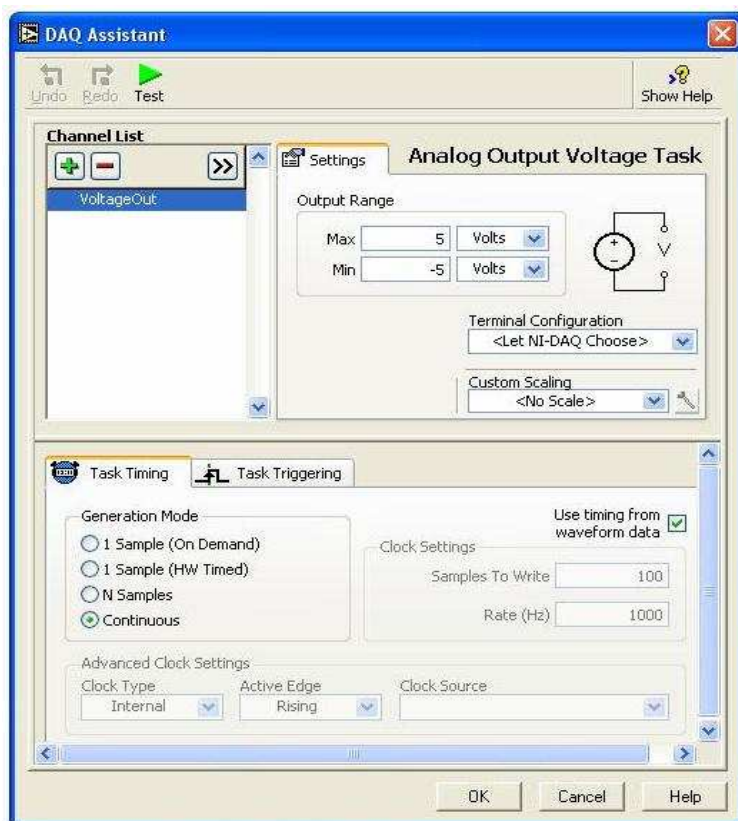
NI PCI-6221

AI 8	34	68	AI 0
AI 1	33	67	AI GND
AI GND	32	66	AI 9
AI 10	31	65	AI 2
AI 3	30	64	AI GND
AI GND	29	63	AI 11
AI 4	28	62	AI SENSE
AI GND	27	61	AI 12
AI 13	26	60	AI 5
AI 6	25	59	AI GND
AI GND	24	58	AI 14
AI 15	23	57	AI 7
AO 0	22	56	AI GND
AO 1	21	55	AO GND
NC	20	54	AO GND
P0.4	19	53	D GND
D GND	18	52	P0.0
P0.1	17	51	P0.5
P0.6	16	50	D GND
D GND	15	49	P0.2
+5 V	14	48	P0.7
D GND	13	47	P0.3
D GND	12	46	AI HOLD COMP
PFI 0/AI START TRIG	11	45	EXT STROBE
PFI 1/AI REF TRIG	10	44	D GND
D GND	9	43	PFI 2/AI CONV CLK
+5 V	8	42	PFI 3/CTR 1 SRC
D GND	7	41	PFI 4/CTR 1 GATE
PFI 5/AO SAMP CLK	6	40	CTR 1 OUT
PFI 6/AO START TRIG	5	39	D GND
D GND	4	38	PFI 7/AI SAMP CLK
PFI 8/CTR 0 GATE	3	37	PFI 8/CTR 0 SRC
CTR 0 OUT	2	36	D GND
FREQ OUT	1	35	D GND

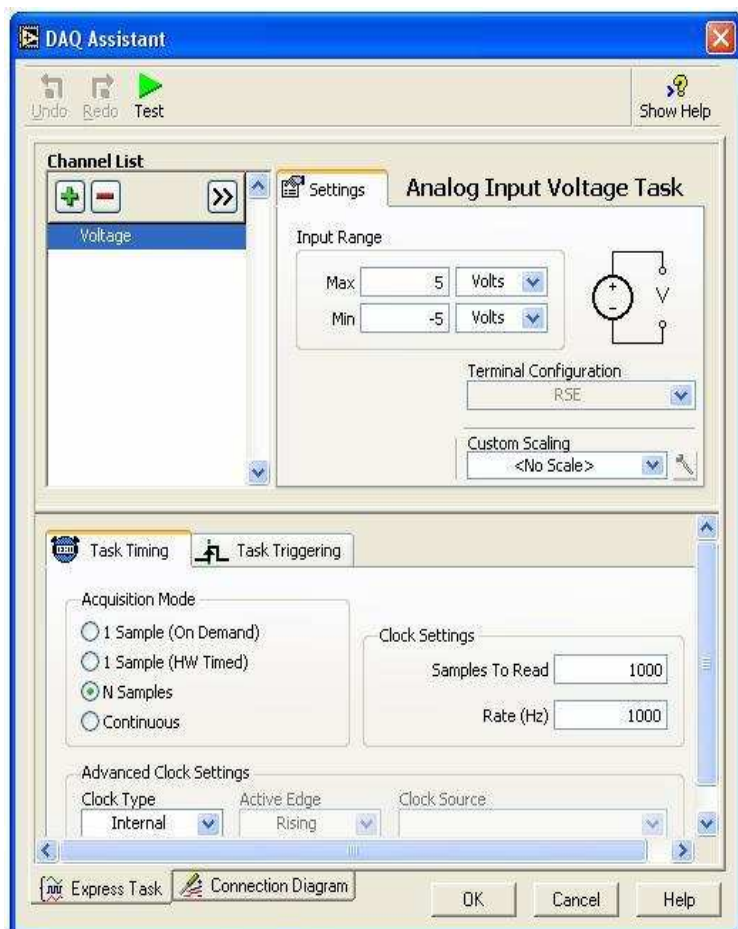
NI PCI-6024E

[8]

Obr. 15.3: Zapojenie pinov meracích kariet NI PCI-6221 a NI PCI-6024E



Obr. 15.4: DAQ Assistant – Analógový napäťový výstup



Obr. 15.5: DAQ Assistant – Analógový napäťový vstup